JULI 2004 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

# Spektrum DER WISSENSCHAFT

SERIE: KOSMOLOGIE (III)

> Viren gegen Krebs
> Genom des Schimpansen
> Mathematik von Netzwerken
> ESSAY: Optische Täuschung

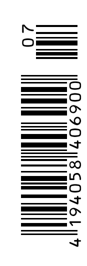
www.spektrum.de

KLIMAWANDEL

## Nach uns die Eiszeit?

Warum »The Day after Tomorrow« so schnell nicht kommt

D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,– €



EVOLUTION

**Optimaler genetischer Code**

ARCHÄOLOGIE

**Nubisches Königreich erkundet**

VERHALTEN

**Warum gähnen wir?**



Reinhard Breuer
Chefredakteur

# Zwischen Treibhaus und Eiszeit-Alarmismus

Es mag ja zutreffen, wenn den Medien eine gewisse Macht zugeschrieben wird. Zumindest auf die öffentliche Meinung haben sie vorübergehend Einfluss, wer möchte das etwa in der Politik bestreiten. Wann hingegen wissenschaftliche Themen auf die öffentliche Agenda geraten, liegt schon viel weniger im Einflussbereich der Massenmedien. Umso erstaunlicher, dass es nun Hollywood gelingt, eine Debatte über die Zukunft des Erdklimas anzufachen – mit einer Wirkung, welche die des Kioto-Protokolls zur Kohlendioxidreduktion zwanglos in den Schatten stellt.

Als Roland Emmerichs Film »The Day after Tomorrow« Ende Mai in die Kinos kam, füllten sich urplötzlich Gazetten und TV-Talkshows mit Fragen wie »Kann uns das wirklich passieren?«, »Sind wir die Schuldigen?« und »Können wir das noch abwenden?«. Auch der Ökothriller »Der Schwarm« von Frank Schätzing schlägt in eine ähnliche Kerbe. In dem Tausendseiter organisieren aggressiv gewordene Meeresbewohner eine Art Racheangriff auf die Menschheit – nach dem Motto: Die Natur schlägt zurück. Inzwischen tourt der Bestsellerautor durch Talkshows mit Klimadebatten.

Was ist dran an der Emmerich'schen Apokalypse? Kann es tatsächlich eintreten, dass die Tierwelt wie in Schätzings Ökokrimi durchdreht? Natürlich geht es in diesen Katastrophenszenarien nur vordergründig um Wissenschaft, das meiste ist Alarmismus und Nervenkitzel, kurz: Unterhaltung. Aber unabhängig davon können Forscher simulieren, was etwa geschieht, wenn der Golfstrom plötzlich zum Erliegen kommt. Daraus könnte sich innerhalb von 20 Jahren ein drastischer Klimaeinbruch ergeben – aber eben nicht in wenigen Tagen, wie der Direktor des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, Jochem Marotzke, kritisch anmerkt (Seite 37). Erdgeschichtlich wäre das nichts Neues, wie der Meteorologe in Emmerichs Film zutreffend referiert: Zuletzt gab es einen solchen Kälteeinbruch am Ende der letzten Eiszeit, vor 12000 Jahren.

**Solche Filme und Bücher rütteln uns wach, gerade weil sie total überzogen sind**

Die Autoren unserer Titelgeschichte, Harald Kohl und Helmut Kühr, liefern die Diagnose des Erdklimas und leiten daraus Prognosen ab. Den wissenschaftlichen Hintergrund für Emmerichs Horrorszenario nehmen die beiden Physiker durchaus ernst und bezeichnen den Klimawandel als »planetare Krankheit«. Die Klimamodelle, auf die sich Kohl und Kühr stützen, basieren auf dem jüngsten Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), der bedeutendsten klimawissenschaftlichen Bewertungsstelle mit politischer Beratungsfunktion.

Kohl ist im Bundesumweltministerium Referent für Klimapolitik, Kühr leitet als Grundlagenforscher die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle. Ihre Botschaft ist simpel und im Prinzip bekannt: Wir brauchen »eine globale, eine planetare Politik«, mit der wir auf den drohenden Klimawandel reagieren – durch Anpassung und Gegensteuern (Seite 32).

Das klingt nicht gut für eine Menschheit, in der mächtige Staaten wie die USA das Kioto-Protokoll bisher nicht unterschrieben haben. »Wir sind als Individuen nicht ausreichend verdrahtet«, notiert Patrick Illinger in der Süddeutschen Zeitung, »um langfristige Gefahren und mittelbare Zusammenhänge emotional zu bewerten.« Vielleicht brauchen wir solche Katastrophenfilme und Ökothriller, um aufzuwachen, gerade weil sie total überzogen sind.

INHALT

## SPEKTROGRAMM



## FORSCHUNG AKTUELL



## THEMEN



**Titelbild**: Im Film »The day after tomorrow« ereilt Manhattan eine Flutwelle, die durch einen dramatischen Temperatursturz sofort gefriert. *Bild: CINETEXT*

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

SEITE 24

KREBSMEDIZIN

### Mit Viren gegen Krebs

Tumoren zerstören, ohne gesunde Zellen zu schädigen: Die Virotherapie könnte diesen lange gehegten Wunschtraum der Medizin wahr machen

SEITE 42

SERIE: DER BESCHLEUNIGTE KOSMOS (TEIL III)

### Das Tempo der Expansion und die geheimen Wege der Gravitation



Vor rund fünf Milliarden Jahren begann die gegenwärtige Epoche beschleunigter Ausdehnung. Der Grund könnte eine geringfügige Schwächung der Schwerkraft durch zusätzliche Raumdimensionen sein

SEITE 58

SINNESTÄUSCHUNGEN

### Essay: Sehen ist Glaubenssache

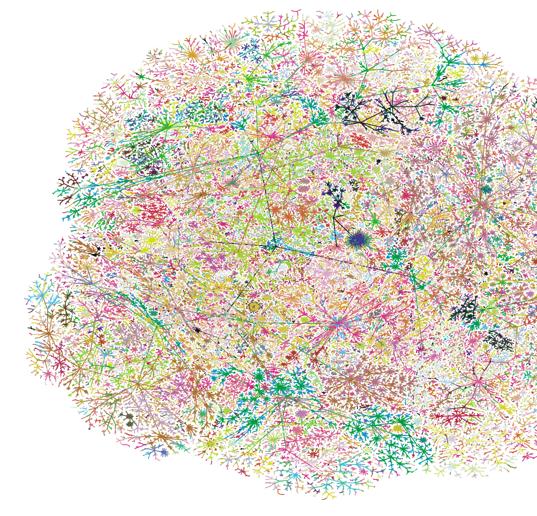
Sinnestäuschungen verraten, welche verborgenen Sehregeln unser Gehirn uns vorgibt

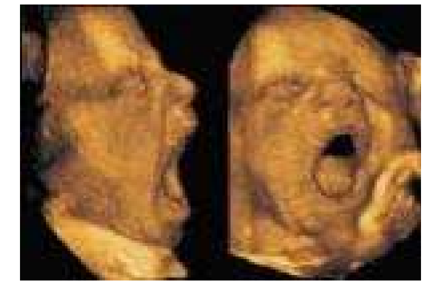
SEITE 62

NETZWERKE

### Skalenfreie Netze

Komplexe Netze von Beziehungen der verschiedensten Art gehorchen gemeinsamen Organisationsprinzipien





SEITE 70

PSYCHOBIOLOGIE

### Warum gähnen wir?

Gähnen kommt aus dem Stammhirn und tritt schon bei Reptilien auf. Doch nur Menschen lassen sich davon anstecken. So stimmen sie sich unwillkürlich aufeinander ein

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

SEITE 32

**TITELTHEMA** **KLIMAFORSCHUNG**

# Klimawandel auf der Erde

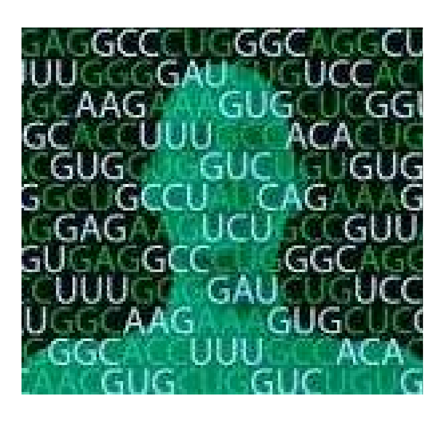
Derzeit sorgt Roland Emmerichs »The day after tomorrow« für Furore. Der wissenschaftliche Hintergrund dieses Horrorszenarios ist durchaus seriös: Dass sich unser Klima dramatisch wandelt, lässt sich nicht mehr leugnen

SEITE 86

EVOLUTION

## Der raffinierte Code des Lebens

Das Codierungssystem für die Aminosäuren im Erbgut ist so geschickt konzipiert, dass es katastrophalen Fehlern vorbeugt und zugleich die Evolution beschleunigt

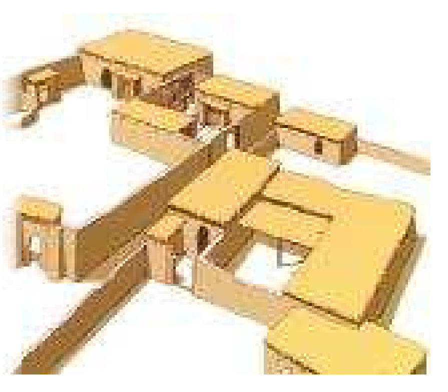


SEITE 94

ARCHÄOLOGIE

## Königreich der Viehzüchter

Ein Palast aus Hütten, Totenkult, Importwaren aus Ägypten – das nubische Königreich von Kerma gibt noch manche Rätsel auf



**J U L I  2 0 0 4**

REZENSIONEN



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN



KOMMENTAR



WISSENSCHAFT IM ...



WEITERE RUBRIKEN



SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

## Kosmische Lebenskunst

Was ist wahre Weisheit? Sie aktiv auszuüben, meint der französische Philosoph Pierre Hadot

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

## Bürokratische statt vernünftiger Regelungen

Interview mit Michael Herschel
Mai 2004

Herr Dr. Herschel gibt in dem Interview die Fristen zur Genehmigung klinischer Prüfungen nicht korrekt wieder. Gemäß der Richtlinie 2001/20/EG des Europäischen Parlaments gilt für die Ethikkommission eine Frist von 60 plus 30 Tagen für Arzneimittel zur Gentherapie oder somatischen Zelltherapie oder für alle Arzneimittel mit genetisch veränderten Organismen. Bei diesen Produkten kann diese 90-Tage-Frist um weitere 90 Tage nach Konsultation von anderen Gremien gemäß den Regelungen und Verfahren der EU-Mitgliedsstaaten verlängert werden. Nur im Fall der Therapie mit Zellen, Geweben oder Organen, die nicht vom Menschen stammen, gibt es überhaupt keine zeitliche Begrenzung für den Genehmigungszeitraum.

PD Dr. Christian J. Buchholz,
PD Dr. Ralf R. Tönjes, Langen

**Antwort von Dr. Michael Herschel**

Für die Richtigstellung zur Frist für Studien zur Gentherapie danke ich den Herren Buchholz und Tönjes vom Paul-Ehrlich-Institut.

Die Beratungsfrist von 60 plus 30 sowie weiteren möglich 90 Tagen (also bis zu 180 Tagen) ist allerdings praktisch fast so, als gäbe es keine Frist: denn da wird sich ein Sponsor überlegen, ob er in Deutschland seine Studie durchführt. Ich mache mir im Übrigen gar keine Sorgen, dass das Paul-Ehrlich-Institut (PEI) Fristen extensiv »nutzen« würde.

Die bisherige Erfahrung hat gezeigt, dass das PEI schnell und gründlich arbeitet und dafür in ganz Europa bekannt ist. Dies gilt leider nicht für einige Ethikkommissionen.

**Briefe an die Redaktion …**

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729

---

## Ich, Klon

Kommentar, April 2004

**Grenzen werden überschritten**

Was ist mit Klonen, die am Anfang nicht so ganz gelingen? Sind das dann auch schon Menschen oder ist das noch Forschungsmaterial?

Was ist mit der gezielten genetischen Machbarkeit von bestimmten Menschentypen? Wer hat das Recht an einem Klon? Die Eltern? Hinter der Herstellung eines Klons steht ein bestimmter Wunsch, ein Ziel, warum eine exakte Kopie hergestellt werden soll. Entweder das Interesse an wissenschaftlicher Machbarkeit, an einer neuen Form der Selbstverwirklichung oder an einer gewissen Typisierung und Zweckbestimmung von Menschen.

Und wenn der Hersteller dieser Kopie dann auch die Erziehungsberechtigung hat, was bedeutet das für den geklonten Menschen? Hier werden wichtige Grenzen überschritten und ich denke, wer sich diesen Fragen nicht stellt, hat noch nicht einmal ansatzweise verstanden, was da geschieht.

Claudia Krysztofiak, Sankt Augustin

**Menschen-Experimente prinzipiell unethisch**

Die Behauptung, die Entstehung abnormer Menschen werde schon bewirken, dass die Klonierung in diesem Falle mangels Interesse nicht erfolgen werde, ist zumindest als naiv zu betrachten. Was wäre denn »abnorm«? Besonders aggressives Verhalten? Oder reduzierte Intelligenz? Dafür sind diverse Interessenten-Szenarios denkbar. Genau genommen ist diese Argumentation sogar völlig abwegig, denn es ist sicherlich nicht zu erwarten, dass die Forschung infolge anhaltender Misserfolge eingestellt wird – man wird vermutlich auf anderen Wegen versuchen, zum Ziel zu gelangen.

Das wirkliche Problem ist aber nicht etwa fehlende Menschenwürde der Klone, sondern die Tatsache, dass die Klone Menschen sind: Nicht die Klonproduktion an sich ist verwerflich. Es ist vielmehr der Weg dahin, der aus ethischen Gründen nicht beschritten werden sollte. Da ein menschlicher Klon ein vollwertiger Mensch ist, also auch die Menschenwürde hat, selbst wenn sie ihm nicht von Anfang an attestiert wird – irgendwann hat er sie – handelt es sich bei derartigen Experimenten um Menschenexperimente, die prinzipiell unethisch sind. Naturgemäß ist es nämlich unausweichlich, dass Klone im Rahmen der Experimente sterben werden. Also handelt es sich sogar um Experimente, bei denen bewusst Verluste an Menschenleben in Kauf genommen werden – »verbrauchende Menschen-Forschung«! Das hat es seit dem Dritten Reich nicht mehr gegeben und sollte es eigentlich auch fürderhin nie mehr geben!

Dr. Andreas Fuß, Delbrück

**Berechtigte Skepsis**

Seit geraumer Zeit werden die ethischen Probleme im Zusammenhang mit dem Klonen ernsthaft diskutiert. Dabei haben die Gegner des Klonens bedenkenswerte Argumente vorgebracht und sie ausführlich begründet.

Ihr Autor Michael Shermer, der das Klonen befürwortet, fertigt die Gegner des



Klonens mit einigen schnoddrigen Sätzen und Ausdrücken ab. Dieser Artikel zeigt wieder einmal, wie berechtigt die Skepsis gegenüber den Ausführungen von Naturwissenschaftlern ist, die nicht ihr enges Fachgebiet betreffen.

Dr. Heribert Büchs, Friedberg

## Pjotr Kropotkin oder Konrad Lorenz?

Essay, März 2004

**Aggression und Aggressionshemmung**

Erstens ist Aggression nicht grundsätzlich böse oder gewalttätig. Zweitens finde ich es unglaublich, dass Konrad Lorenz hier noch als derjenige zitiert wird, der destruktive Auswüchse der Aggression mit angeborenen aggressiven Verhaltenselementen »entschuldigt«.

Bereits vor über dreißig Jahren stellte Lorenz den von ihm postulierten angeborenen aggressiven Verhaltenselementen beim Menschen angeborene Verhaltenselemente sowohl zu Vermeidung von destruktiver Aggression (Ritualisierung und angeborene Aggressionshemmung) als auch zur Knüpfung von Bändern zwischen Menschen entgegen. Völlig übersehen wurde im Artikel die Stellung der beteiligten Kinder in der Gruppe – die Rangordnung. Meist geschieht die Konfliktlösung in der Gruppe nämlich durch »ranghohe« Kinder, also solche, die besonderen Respekt genießen. Zu diesem Thema wurde bereits vor zwanzig Jahren am Max-Planck-Institut für Humanethologie in Seewiesen geforscht.

Angelika Bauser-Eckstein, Immenstaad

## Innovation in Deutschland

Sonderteil, April 2004

**Auch nach sozialen Kriterien orientieren**

Die Innovationsexperten beschwören die Zukunft und dabei tun sie so, als wäre alles noch wie früher. Wir leben aber in einer Zeit von Steuerflucht und Arbeitsplatzexport.

Was nutzen uns da Innovationen, solange sie nur den Firmen gehören? Wenn deutsche Firmen mit Innovationen Erfolg haben, bedeutet das bloß, dass deutsche Unternehmer hohe Gewinne machen. Der deutsche Staat hat nichts davon, wenn die Steuern auf den Bahamas anfallen. Die deutschen Werktätigen haben nichts davon, wenn in Rumänien produziert wird. Deshalb muss sich die Forschungspolitik unabdingbar auch nach sozialen Kriterien orientieren.

Gefördert werden darf nur, wer die Allgemeinheit gebührend am Ertrag der Innovationen teilhaben lässt!

Dr. Wilfried Müller, Unterföhring

## Karikaturen von OH

Ganz nebenbei gratuliere ich als langjähriger Leser zu den jedes Mal famosen Karikaturen von OH (Prof. Oswald Huber, Neuchâtel). Ich finde sie extrem abgedreht und freue mich immer wieder, wenn sie den Kontrapunkt zu einem Beitrag bilden. Weiter so!

Prof. Wilfried Kunstmann, Bochum

## Wie wir lernen, die Welt zu begreifen

Februar 2004

Ein Befund in diesem Artikel könnte noch als viel bedeutsamer herausgestrichen werden. Kinder schauen bereits mit fünf Monaten länger auf Gesichter, deren Mimik mit der Stimme übereinstimmt. Fehlende Kohärenz ist also nicht attraktiv. Wie häufig kommunizieren wir jedoch als Eltern und in der Schule im Bereich der doppeldeutigen Informationen. Der beschriebene Befund legt nahe, dass Kinder dies früh erkennen und, dies ist meine Hypothese, damit oft über lange Zeit emotional sehr überfordert sind.

Peter Diezi-Duplain, Zürich

## Erratum

**Muskelmotor im Rückwärtsgang**

Mai 2004

Die gemessene Bewegungsgeschwindigkeit der künstlichen Muskelmotoren betrug 700 Nanometer (nicht Mikrometer) pro Sekunde. Das ist für Myosin aus der Amöbe *Dictyostelium*, mit dem die Gruppe um Dietmar Manstein an der Medizinischen Hochschule Hannover arbeitete, ein normaler Wert. Die künstlichen Motoren funktionieren also genauso gut wie das natürliche Original. Der Vergleich in dem Artikel bezog sich auf das wesentlich schnellere Myosin II aus den Skelettmuskeln der Wirbeltiere und war insofern »unfair«.

Die Redaktion


**Spektrum** DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
**Stellvertretende Chefredakteure:** Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
**Redaktion**: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
**Ständiger Mitarbeiter:** Dr. Michael Springer
**Schlussredaktion:** Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
**Art Direction:** Karsten Kramarczik
**Layout:** Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Naghib, Natalie Schäfer
**Redaktionsassistenz:** Eva Kahlmann, Ursula Wessels
**Redaktionsanschrift:** Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751
**Verlagsleiter:** Dr. Carsten Könneker
**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck
**Korrespondenten:** Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. 0211 90833-57, Fax 0211 90833-58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
**Herstellung:** Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Daniel Fischer, Dr. Markus Fischer, PD Dr. Udo Gansloßer, Dr. Andreas Nestke, Dr. Frank Schubert, Michael Vogel.

**Leser- und Bestellservice:** Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com

**Vertrieb und Abonnementverwaltung:** Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. 06201 6061-50, Fax 06201 6061-94
**Bezugspreise:** Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)

**Anzeigen:** GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. 0211 88723-79, Fax 0211 88723-99; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
**Anzeigenvertretung:** Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686150, Fax 030 6159005, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Detlef Cölln, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183/-183/ -193, Fax 040 339090; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67 D-40213 Düsseldorf, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 301352060, Fax 0211 133974; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Klaus Haroth, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-36, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Norbert Niederhof, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-40, Fax 0711 22475-49; München: Bernd Schwetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. 089 545907-14, Fax 089 545907-16
**Druckunterlagen an:** GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0711 88723-87, Fax 0211 374955

**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 25 vom 01.01.2004.
**Gesamtherstellung:** Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen





ISSN 0170-2971

**SCIENTIFIC AMERICAN**
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President and International Manager: Dean Sanderson

GERALD MAYR, FORSCHUNGSINSTITUT SENCKENBERG

PALÄONTOLOGIE

## Kolibri auf Abwegen

*Eurotrochilus inexpectatus* – einen treffenderen Namen hätte Gerald Mayr kaum wählen können. Das Skelett, das der Paläontologe vom Forschungsinstitut Senckenberg in Frankfurt derart benannte, ist wirklich ein höchst unerwarteter Fund: Es stammt von einem Kolibri, der vor 30 bis 34 Millionen Jahren in Deutschland lebte. Nach gängiger Meinung sind diese Vögel, die heute nur in Amerika vorkommen und deren Ursprung folglich auch dort vermutet wird, aber nie in Eurasien gewesen. Doch das ist wohl ein Irrtum. Mayr entdeckte das etwa vier Zentimeter große Skelett aus einer Tongrube südlich von Wiesloch im Lager eines Stuttgarter Museums. Ihm fielen die extrem kurzen Oberarmknochen auf, die in einer kleinen Knochenkugel enden – ein typisches Merkmal der Kolibris, das ihnen den bekannten Flug auf der Stelle ermöglicht. Außerdem zeigte das Fossil den charakteristischen langen Schnabel. Der Fund ist damit zugleich der älteste Nachweis für die Ernährungsweise dieser Vögel. Außerdem könnte er ein altes Rätsel lösen: In Eurasien und Afrika gibt es Pflanzen, deren Blüten bestens für langschnäblige Nektarfresser geeignet sind. Sollte es auch dort einst Kolibris gegeben haben, würde das die Anpassung erklären. Damit stellt sich nur die Frage, warum die Flugkünstler bei uns ausgestorben sind. *(Science, 7. 5. 2004, S. 861)*

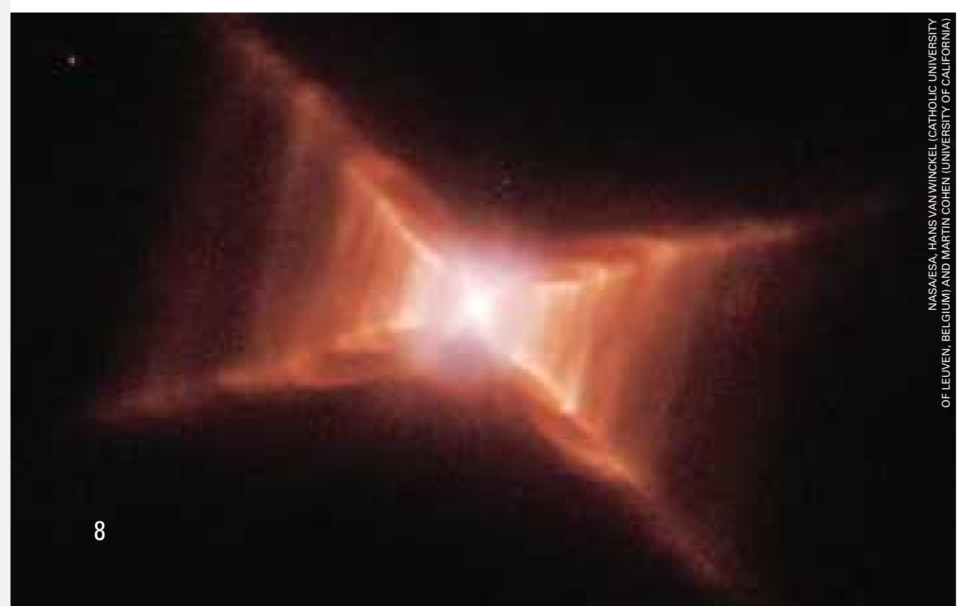
▲ Der überraschende Fund eines Kolibriskeletts (oben) nahe Heidelberg beweist, dass die Nektarfresser vor 30 Millionen Jahren auch in Europa lebten.

ASTRONOMIE

## Eine schöne Form des Alterns

Entdeckt wurde das ungewöhnliche »Rote Rechteck« HD 44179, das rund 2300 Lichtjahre von der Erde entfernt im Sternbild Einhorn liegt, schon in den frühen 1970er Jahren bei der Suche nach starken Infrarotquellen im All. Doch nun hat das Hubble-Weltraumteleskop mit seiner Wide Field Planetary Camera 2 überraschende Einzelheiten dieses reizvollen Planetarischen Nebels enthüllt. Danach sieht er aus wie ein Gestell aus zwei x-förmig gekreuzten Stangen, über das eine Serie unterschiedlich großer, transparenter Tücher gebreitet ist. Deren Ränder erwecken den Eindruck von Sprossen, die sich zwischen den Stangen erstrecken und eine Art Himmelsleiter bilden.

Die Wissenschaftler aus den USA und Belgien, welche die Aufnahme machten, liefern auch eine Erklärung für diese seltsame Struktur. Danach ist zumindest ein Partner des Doppelsternsystems in der Mitte des roten Vierecks sonnenähnlich und nähert sich dem Ende seiner Laufbahn. Seit gut 14000 Jahren stößt er deshalb schubweise – mit einer Periode von wenigen hundert Jahren – in entgegengesetzten Richtungen seine äußeren Schichten ab. Das weggeschleuderte Material expandiert und bildet zwei Kegel, die sich in der Mitte berühren und auf die wir zufällig genau von der Seite blicken. Deshalb erscheinen sie wie ineinander geschachtelte gleichseitige Dreiecke. Welche Moleküle die auffallende rote Farbe erzeugen, ist noch unklar. Nach Ansicht der Wissenschaftler könnte es sich um Kohlenwasserstoffe handeln. *(The Astronomical Journal, April 2004, S. 2362)*



NASA/ESA, HANS VAN WINCKEL (CATHOLIC UNIVERSITY OF LEUVEN, BELGIUM) AND MARTIN COHEN (UNIVERSITY OF CALIFORNIA)

◀ Die ungewöhnliche Himmelsleiter im Sternbild Einhorn ist einem Doppelsternsystem zu verdanken, das periodisch Gas und Staub abstößt.



JOHANNES FERDINAND

URMENSCHEN

# Ältester Feuerplatz



Y. LANGSAM

Archäologen um Naama Goren-Inbar von der Hebräischen Universität in Jerusalem haben am Jordan in der Nähe der Golanhöhen einen 800 000 Jahre alten Feuerplatz aufgespürt. An der Fundstelle Gesher Benot Ya'aqov entdeckten sie zwischen Resten essbarer Pflanzen – Oliven, Trauben und Gerste – vereinzelt verkohlte Samen. Ein natürliches Feuer als Ursache der Brandspuren scheiden die Forscher aus, da es mehr als nur zwei Prozent der Materialien versengt hätte. Zudem gibt es an der Fundstelle auch Feuersteine.

Die Entdeckung kann als kleine Sensation gelten. Die Brandstätte am Jordan gehört nämlich zu den wenigen, die nicht in einer Höhle liegen. Vor allem aber ist sie gut 300 000 Jahre älter als der bisherige Rekordhalter in der chinesischen Höhle Zhoukoudian. Goren-Inbar und seine Kollegen sehen in der Beherrschung des Feuers die Voraussetzung für die Besiedelung des kalten europäischen Kontinents durch den Menschen. Tatsächlich datieren die ersten klaren Spuren menschlichen Lebens in Europa in die gleiche Zeit wie der neu entdeckte Feuerplatz.

*(Science, 30. April 2004, S. 725)*

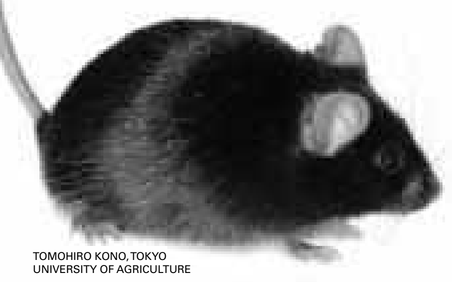
▼ **An diesem 800 000 Jahre alten Siedlungsplatz am Jordan fanden sich neben Feuersteinen einige verbrannte Samenkörner (Bild oben) – Zeugnisse eines vom Menschen entzündeten Feuers.**



MORDECHAI E. KISLEV, BAR-ILAN UNIVERSITY, RAMAT GAN, ISRAEL

GENTECHNIK

# Aus für Papa Maus



TOMOHIRO KONO, TOKYO UNIVERSITY OF AGRICULTURE

◀ **Diese Maus hat keinen Vater, ist inzwischen selbst aber schon auf natürlichem Wege Mutter geworden. Japanische und koreanische Forscher züchteten das Tier aus zwei weiblichen Chromosomensätzen.**

Männer, aufgepasst! Einem japanisch-koreanischen Forscherteam um Tomohiro Kono von der Universität für Landwirtschaft in Tokio ist es gelungen, eine Maus ohne Vater zu zeugen – allerdings erst nach 598 vergeblichen Versuchen. Außerdem waren vier Mütter nötig: Eine lieferte die Eihülle, jeweils ein Weibchen stellte ihren halben Chromosomensatz aus einer Eizelle zur Verfügung, und eine Leihmutter trug den Embryo aus. Heraus kam Kaguya – auch ein Weibchen natürlich, das nach einer japanischen Märchenfigur benannt ist.

Entscheidend für das Gelingen des Experiments war ein Eingriff in das Erbgut einer der beiden genetischen Mütter. Unter anderem entfernten die Wissenschaftler auf dem Chromosom 7 einen großen Teil des so genannten H19-Komplexes. Dieser ist bei der normalen Embryonalentwicklung auf einem väterlichen Chromosom ausgeschaltet – ein als genomische Prägung bekanntes Phänomen. Auf diese Weise täuschten die Forscher das Vorhandensein eines männlichen Chromosomensatzes vor. Der Weg zur männerlosen Gesellschaft – außerhalb der Säugerwelt durchaus keine Seltenheit – scheint damit geebnet. Doch so lange noch knapp 600 weibliche Genome als Ersatz für ein männliches benötigt werden, dürften die Väter so bald nicht aussterben.

*(Nature, 22. 4. 2004, S. 860)*

BIONIK

# Vom Wal besser fliegen lernen

Vielleicht sehen Flugzeugflügel künftig aus wie die Brustflossen von Buckelwalen. Die haben mit ihren gewellten Kanten jedenfalls viel bessere aerodynamische Eigenschaften als die heute üblichen glatten Tragflächen. Frank Fish von der Universität West Chester (Pennsylvania) und seine Kollegen ermittelten einen gut acht Prozent höheren Auftrieb; gleichzeitig ist der Luftwiderstand um 32 Prozent geringer. Zudem sinkt die Gefahr eines Strömungsabrisses, bei dem das Flugzeug unsteuerbar absackt.

Die Forscher vermuten, dass die Ausbuchtungen an der Anströmkante winzig kleine Wirbel bilden, welche die vorbeiströmende Luft an den Flügel binden. Diese Erklärung widerspricht jedoch allen bisherigen aerodynamischen Theorien. Daher kam bislang niemand auf die Idee, solch ein buckliges Profil zu untersuchen. Fish und seine Kollegen wollen das Phänomen jetzt systematisch ergründen. Ihre Erkenntnisse könnten die Flugtechnik revolutionieren; denn bessere Strömungseigenschaften der Tragflächen sparen Treibstoff und erhöhen die Manövrierbarkeit des Flugzeugs.

*(Physics of Fluids, Mai 2004, S. L39)*

▼ Gewellte Anströmkanten wie bei der Flosse eines Buckelwals verbessern die aerodynamischen Eigenschaften eines Flügels.



VORDERGRUND: DUKE UNIVERSITY PHOTOGRAPHY; HINTERGRUND: W. W. ROSSITER, CETACEAN SOCIETY INTERNATIONAL

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

BIOLOGIE

# Tödliches Schnippen

Kalifornische Wissenschaftler haben den wohl brutalsten Schläger im Tierreich ausgemacht: einen Shrimp! Über die Stärke der Boxhiebe von Vitali Klitschko kann der Bunte Fangschreckenkrebs *Odontactylus scyllarus* nur lachen: Mit einer Beschleunigung von hundert Kilometern pro Sekundenquadrat schleudert er seine Fangarme mehr als hundertmal so schnell von sich – und das im Wasser. Forscher an der Universität Berkeley (Kalifornien) haben die Bewegung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera verfolgt. Dabei stellten sie allerdings fest, dass die Vordergliedmaßen des Krebses nicht direkt zuschlagen. Wenn sie in knapp drei Millisekunden durchs Wasser sausen, bilden sie vielmehr winzige Gasbläschen, die dann jäh implodieren und so das Opfer betäuben. Der Effekt ist bei Schiffsschrauben als Kavitation bekannt. Um die enorme Schnellkraft zu erzeugen, benutzt der Shrimp einen Klickmechanismus. Er verhakt seine Fangarme zunächst und spannt die Muskeln bis zum Bersten an, bevor er sie entriegelt und wegschleudert. Dabei erzeugt er mit rund 470 Kilowatt pro Kilogramm gut 70-mal so viel Power, wie im Ferrari von Michael Schumacher steckt. *(Nature, 22.4. 2004, S. 819)*

◄ Der Bunte Fangschreckenkrebs erzeugt durch das Wegschleudern seiner Fangarme implodierende Gasbläschen, die sein Opfer betäuben.

QUANTENPHYSIK

# Transvestiten im Teilchenzoo

Die Unterscheidung zwischen Bosonen und Fermionen ist in der Teilchenphysik so fundamental wie die zwischen Männlein und Weiblein in der Biologie. Insofern könnte man, was Forschern des Münchner Max-Planck-Instituts für Quantenoptik und der Universität Mainz nun gelungen ist, als Schaffung von Transvestiten in der Teilchenwelt bezeichnen. Bosonen haben ganzzahligen Spin (Eigendrehimpuls) und sind gesellig: Sie drängen sich, wenn es kalt wird, dicht zusammen oder – weniger blumig – nehmen denselben Zustand ein.

Dagegen machen sich Fermionen mit ihrem halbzahligen Spin partout nicht gemein: Jedes beharrt stets auf seinem eigenen Platz. Allerdings haben die US-Physiker Lewi Tonks und Marvin Girardeau schon vor fast vierzig Jahren einen Materiezustand vorausgesagt, in dem Bosonen sich ähnlich eigenbrötlerisch geben wie Fermionen. Er setzt voraus, dass sich die Teilchen nur längs eindimensionaler Röhren hintereinander bewegen können.

Die deutschen Forscher konnten ein solches Tonks-Girardeau-Gas nun erstmals erzeugen. Sie zwangen die Atome eines Bose-Einstein-Kondensats – quasi eine Verbrüderungsorgie von extrem kalten Bosonen, in der sie alle ein Herz und eine Seele sind – per Laser in ein Lichtgitter aus winzigen Potenzialröhren. Mit einem periodischen Potenzial entlang der Röhren sorgten die Forscher dann für eine relativ starke gegenseitige Abstoßung der Teilchen. Damit imitierten sie das Ausschlussprinzip der Fermionen. Die erfolgreiche Separation der Bosonen zeigte sich in der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung der Atome nach Abschalten des Potenzials: Sie entsprach genau derjenigen, die sich für ein Tonks-Girardeau-Gas berechnen lässt. *(Nature, 20. 5. 2004, S. 277)*

▼ Bosonische Rubidiumatome, die in eindimensionale »Röhren« gesperrt wurden, zeigen nach dem Anlegen eines periodischen Potenzials eine ähnlich breite Geschwindigkeitsverteilung längs der Röhrenrichtung wie Fermionen.



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR QUANTENOPTIK

Mitarbeit: Gerhard Samulat

# Galaktischer Springbrunnen

Riesige Gasfontänen schießen seitlich aus der ovalen Scheibe der Galaxie M 82 im Sternbild Großer Bär. Dieser galaktische »Superwind« erstreckt sich mehr als 10 000 Lichtjahre weit ins All. Das farbcodierte Bild ist die Überlagerung einer Aufnahme des Kitt-Peak-Observatoriums in Arizona mit einem kleineren, hoch aufgelösten Schnappschuss des Hubble-Weltraumteleskops. In Rot leuchten angeregte Wasserstoffatome, die anderen Farben zeigen Stickstoff und Schwefel an. Besonders filigran und komplex erscheint das innere Gewebe der Gasströme. Was sie antreibt, ist noch unklar. Fest steht nur, dass in M 82 zehnmal so schnell neue Sterne entstehen wie in unserer Milchstraße. Es handelt sich um das Paradebeispiel einer Starburst-Galaxie. Auslöser der starken Aktivität war eventuell eine nahe Begegnung mit der Nachbargalaxie M 81 vor 100 Millionen Jahren.

BIMARK WESTMOQUETTE (UNIVERSITY COLLEGE LONDON), JAY GALLAGHER (UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON), LINDA SMITH (UNIVERSITY COLLEGE LONDON), WIYN/NSF, NASA/ESAS

SCHIMPANSEN-GENOM

# Bruder Affe – oder doch nur Vetter?

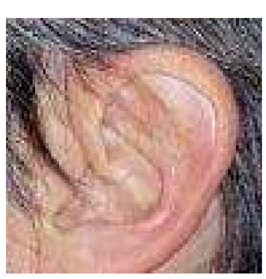
Nun ist auch das Erbgut des Schimpansen entziffert. Damit werden die genetischen Unterschiede zwischen ihm und dem Menschen im Detail erforschbar. Erste Ergebnisse offenbaren überraschende Differenzen.

Von Henning Engeln

Als magische Größe galt bislang die Zahl 98,5 Prozent. So hoch bezifferten Genetiker die Übereinstimmung in der Erbsubstanz von Schimpanse und Mensch und betonten damit, wie nahe sich die beiden Arten stehen. Im Juni 2003 präsentierten Molekulargenetiker und Anatomen der Wayne-State-Universität in Detroit (Michigan) sogar eine Studie, wonach die Reihenfolge der genetischen Buchstaben (DNA-Basen) bei *Homo sapiens* und *Pan troglodytes* bis zu 99,4 Prozent identisch ist.

Derek E. Wildman und seine Kollegen hatten die DNA des Menschen und verschiedener Affenarten an 97 funktionell wichtigen Genen aus dem Zellkern analysiert und die Sequenzen miteinander verglichen. Aus der festgestellten großen Ähnlichkeit zogen sie eine radikale Konsequenz: Sie schlugen vor, alle großen Menschenaffen mit dem Menschen in der Familie Hominidae zusammenzufassen und Schimpansen samt Bonobos der Gattung *Homo* zuzuschlagen (Spektrum der Wissenschaft 8/2003, S. 16).

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.







RECHTE SPALTE: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die größten genetischen Unterschiede zwischen Schimpanse und Mensch betreffen Hören, Riechen und Sprechen.

Doch schossen die Detroiter Bilderstürmer wohl über das Ziel hinaus. Wie nahe Mensch und Schimpanse verwandt sind, lässt sich an nur hundert Genen nicht wirklich klären. Dazu muss man das vollständige Erbgut beider Arten analysieren, was erst jetzt möglich ist. Im vergangenen Dezember verkündete ein Konsortium unter Leitung von Eric Lander vom Broad Institute in Cambridge (Massachusetts) und Richard K. Wilson von der Washington-Universität in St. Louis (Missouri), die 3,1 Milliarden DNA-Basen eines männlichen Schimpansen komplett entziffert zu haben.

Allerdings handelt es sich nur um eine vorläufige »Arbeitsversion«. Die Forscher verwendeten die von Craig Venter und der Firma Celera entwickelte Methode, das komplette Genom wie mit einer Schrotflinte in winzige Teile zu »zerschießen« und diese dann einzeln in Bakterien zu vermehren und zu sequenzieren. Anhand von Überlappungen werden die Bruchstücke schließlich zusammengesetzt. Das gelingt aber nur verlässlich, wenn jede Base im Durchschnitt in zehn verschiedenen Fragmenten lokalisiert wurde. Die jetzige Schimpansen-Analyse hat lediglich eine vierfache Redundanz, sodass sich viele Bruchstücke noch nicht sicher einordnen lassen.

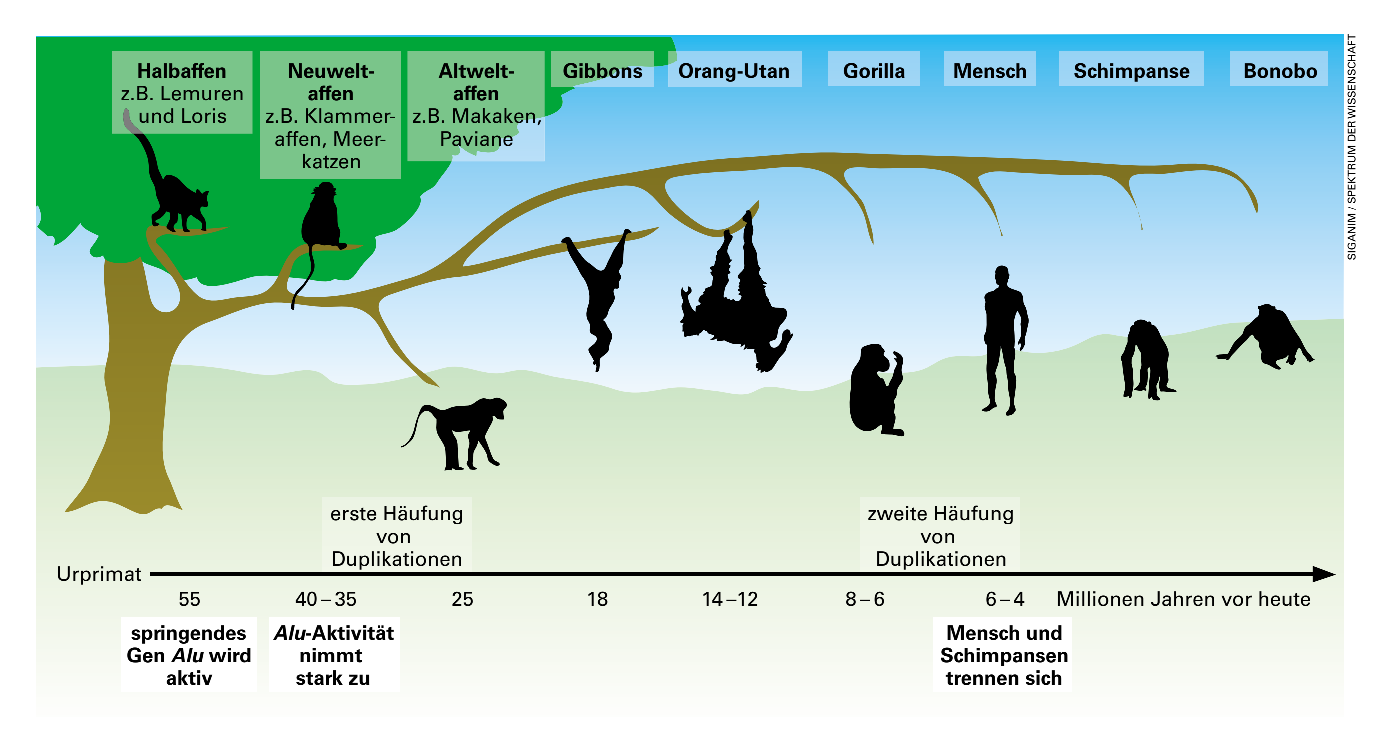
Schon im Juli vergangenen Jahres hatte ein deutsch-asiatisches Konsortium allerdings das Schimpansenchromosom 22 mit einer anderen Methode sehr viel präziser entziffert. Zwar macht es mit seinen 33,2 Millionen Basen nur rund ein Prozent des Affengenoms aus, doch dürfte es durchaus repräsentativ für das gesamte Erbgut sein. Inzwischen haben es die Forscher mit dem entsprechenden menschlichen Chromosom 21 verglichen und können mit ersten Ergebnissen aufwarten *(Nature, 27.5.2004, S. 382).*

»Der interessanteste Punkt ist: Die beiden Genome sind unterschiedlicher, als man bislang geglaubt hat«, resümiert Marie-Laure Yaspo vom Max-Planck-Institut für molekulare Genetik in Berlin, die an den Arbeiten beteiligt war. Das merkt man freilich nicht, wenn man jeweils nur kurze DNA-Abschnitte oder einzelne Gene miteinander vergleicht. Tatsächlich fanden die Molekulargenetiker lediglich 1,44 Prozent ausgetauschte Basen. Der Unterschied beruht vielmehr hauptsächlich auf Insertionen (bei denen DNA-Abschnitte von einer Stelle im Chromosom an eine andere gewandert sind) sowie Deletionen und Duplikationen (Verlusten und Verdopplungen von DNA). In all diesen Fällen ändert sich die Abfolge der Basen selbst nicht.

## Vorteil durch doppelte Gene

Das deutsch-asiatische Konsortium spürte die beachtliche Zahl von 68000 Insertionen oder Deletionen auf. Diese scheinen die Struktur vieler Proteine zu beeinflussen. So entdeckten die Forscher, dass mehr als 80 Prozent der 231 untersuchten funktionellen Gene auf dem Chromosom 22 des Schimpansen nicht genau dieselben Aminosäuresequenzen verschlüsseln wie ihre Gegenstücke auf dem menschlichen Chromosom 21. Die Abweichungen finden sich in Genen aus ganz unterschiedlichen Bereichen – darunter solchen für Strukturproteine, Enzyme und Komponenten des Zellgerüsts. Welche Konsequenzen sie für die Evolution des Menschen haben, lässt sich allerdings noch nicht beurteilen. Auffällig ist immerhin, dass Verdopplungen im menschlichen Genom offenbar häufiger vorkommen als beim Schimpansen.

Auf solche Duplikationen hat sich Evan Eichler von der Case-Western-Reserve-Universität in Cleveland (Ohio) spezialisiert. Er schätzt, dass rund fünf Prozent des menschlichen Genoms aus relativ jungen Kopien von DNA-Stücken bestehen, die einige tausend bis mehr als zehntausend Basenpaare lang sind. Bei Mäusen und Ratten hingegen beträgt dieser Anteil nur ein bis zwei Prozent.




**Es gab in der menschlichen Evolution zwei Zeitpunkte, an denen sich Duplikationen im Genom häuften: vor rund 25 Millionen Jahren, als sich Neu- und Altweltaffen schieden, und bei der Separation von Schimpanse und Mensch vor sieben bis acht Millionen Jahren.**

Duplikationen von Genen eröffnen einem Organismus neue Möglichkeiten, indem eine Kopie die alte Funktion beibehält, während die andere mutieren und dabei eine neue Aufgabe übernehmen kann. Bekannte Beispiele dafür sind die Pigmente unserer Sehrezeptoren (Zapfen), die eine unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit haben und so das Farbensehen ermöglichen, oder die vier Myoglobin-Ketten des Hämoglobin-Moleküls, deren Zusammenschluss den Sauerstofftransport sehr viel effizienter macht. Nach den Arbeiten Eichlers und seines Teams gab es in der menschlichen Evolution zwei Zeitpunkte, an denen sich Duplikationen häuften: vor rund 25 Millionen Jahren, als sich Neu- und Altweltaffen schieden, und bei der Auftrennung der Linien von Schimpanse und Mensch vor sieben bis acht Millionen Jahren.

Man hat sogar eine plausible Erklärung für die Häufung von Duplikationen im menschlichen Erbgut: Vor etwa 55 Millionen Jahren begann sich ein »springendes Gen« (Transposon) namens »Alu« in unserem Genom auszubreiten. Eine Million Kopien dieser nur rund 300 Basenpaare langen Alu-Elemente tragen wir heute in uns.

Da sich während des »Crossing over« bei der Reifeteilung (Meiose) jeweils Abschnitte mit der gleichen Basenfolge aneinanderlagern, kann es zu Fehlpaarungen kommen, wenn viele identische Sequenzen eng beieinander liegen. Dann wird das genetische Material nicht mehr korrekt ausgetauscht; vielmehr erhält eines der Chromosomen ein Stück Erbgut doppelt, das dem anderen dafür fehlt.

Laut Eichler konzentrieren sich die Duplikationen beim Menschen auf bestimmte Stellen, an denen bereits ähnliche DNA-Sequenzen dicht nebeneinander liegen. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit weiterer Fehlpaarungen und die Stellen ziehen Verdopplungen wie Magnete an.

Einen etwas anderen Ansatz verfolgte ein US-amerikanisches Team, das die Ergebnisse seiner Untersuchungen am Schimpansengenom ebenfalls im Dezember 2003 präsentierte. Die Gruppen um Andrew G. Clark von der Cornell-Universität in Ithaca (US-Bundesstaat New York) und Michele Cargill von der Firma Celera Diagnostics hatten aus ursprünglich fast 23 000 Genen 7645 herausgesiebt, deren Basenfolge bei Mensch, Schimpanse und Maus bekannt ist. Mit einem statistischen Test ermittelten sie dann jene Erbfaktoren, deren Sequenz sich besonders stark verändert hat.

## Rasante Evolution beim Hören

Das Resultat war verblüffend: Anscheinend haben 1547 Gene beim Menschen und 1534 beim Schimpansen innerhalb der letzten Jahrmillionen eine rasante Evolution erlebt. Es handelt sich vor allem um solche, die mit der Geruchswahrnehmung und der Ernährung zusammenhängen, aber auch um Erbfaktoren, die für das Wachstum der langen Knochen, die Behaarung und das Hören von Bedeutung sind.

Beim Schimpansen fand der größte Wandel in Genen statt, die Skelett und Muskeln betreffen. Beim Menschen sind dagegen vor allem Enzyme mutiert, die Bedeutung für den Aminosäurestoffwechsel haben – für Clark und Cargill ein Hinweis auf die Anpassung des Menschen an eine zunehmend fleischhaltige Kost vor rund zwei Millionen Jahren. Ins Auge stechen auch Veränderungen an drei von 21 Proteinen, die für das Hören wichtig sind. Für Clark liegt hier ein möglicher Schlüssel zur Sprachfähigkeit des Menschen: »Vielleicht sind einige der Gene, die es Menschen ermöglichen, Sprache zu verstehen, nicht nur im Gehirn aktiv, sondern auch am Hören beteiligt«, meint er.

Bei allem Respekt vor den Arbeiten ihrer amerikanischen Kollegen weist Yaspo darauf hin, dass deren Analysen nur einen Teilbereich betreffen. Denn das US-Team hat lediglich die »Exons« der Gene betrachtet – also jene Abschnitte, die tatsächlich in Proteine umgesetzt ▷

▷ werden. Die »Introns«, welche die Zelle aus den Arbeitskopien der Gene vor deren Übersetzung in Proteine herausschneidet, wurden ebensowenig in den Vergleich einbezogen wie Promotoren und andere regulatorische Regionen.

Tatsächlich liegt ein Großteil des Unterschieds zwischen Schimpanse und Mensch aber nicht in den Genen selbst, sondern in dem Plan, nach dem sie in Aktion treten, also ausgeprägt oder »exprimiert« werden. Das hatte eine Gruppe um Wolfgang Enard und Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Genetik in Leipzig schon vor zwei Jahren nachgewiesen. Der Vergleich des Expressionsmusters für Tausende von Genen in diversen Geweben (Hirn, Leber, Blutzellen) bei Menschen, verschiedenen Affenarten und Mäusen erwies: Vor allem im Gehirn hat sich das Aktivierungsschema beim Menschen gegenüber dem Schimpansen stark verändert und die Evolutionsgeschwindigkeit um das Drei- bis Vierfache zugenommen. Das deutsch-asiatische Forscherkonsortium konnte das nun bestätigen. Bei zwanzig Prozent der untersuchten Gene variierte die Expression zwischen Mensch und Schimpanse in Hirn- und Lebergewebe.

### Niedergang des Geruchssinns

Vergangenes Jahr veröffentlichte Pääbo zusammen mit einem israelischen Team eindrucksvolle Ergebnisse über den Niedergang des Geruchssinns beim Menschen. Von den über tausend Genen für olfaktorische Rezeptoren erweisen sich mehr als 60 Prozent als defekt und funktionslos. Beim *Homo sapiens* hatten sich viermal so schnell Mutationen angesammelt wie bei anderen Menschenaffen. Dies passt zu den Arbeiten Cargills und Clarks, die ja ebenfalls eine beschleunigte Evolution bei den olfaktorischen Proteinen registriert hatten.

Noch ist das Bild verschwommen. Aber die Molekularbiologen sind ja auch erst am Anfang ihrer genetischen Vergleiche von Mensch und Schimpanse. Nachdem die Genome beider Spezies nun fast vollständig vorliegen, dürfte es nur noch eine Frage von wenigen Jahren sein, bis im Einzelnen deutlich wird, was den *Homo sapiens* vom Schimpansen unterscheidet und die genetische Grundlage unseres Menschseins ist. ◁

**Henning Engeln** ist promovierter Biologe und lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

KOMMENTAR

## Hungertod eines Meeressäugers

**Die Überfischung der Meere bedroht den Bestand des Mittelmeer-Delfins.**

**Fisch ist teuer geworden.** Zudem stammt das Angebot auf den Märkten aus immer entlegeneren Regionen. Auf dem Eis liegen Zackenbarsch aus der Karibik oder Gambas aus Bangladesh. Der Kabeljau kommt aus dem Pazifik statt aus der Nordsee, und der Thunfisch wurde im Indischen Ozean statt im Atlantik oder Mittelmeer gefangen.

Von einem anderen Drama merkt der Verbraucher dagegen nichts: Der Gemeine Delfin *(Delphinus delphis)* im Mittelmeer steht inzwischen auf der Roten Liste. In den letzten dreißig Jahren ist sein Bestand »drastisch zurückgegangen«; in großen Teilen des Mittelmeers – besonders in den zentralen Regionen – kommt der Säuger fast nicht mehr vor. Dabei war er, wie sein Name schon andeutet, einst sehr häufig.

Was die beiden Fakten verbindet? Sie haben dieselbe Ursache: die Überfischung der Meere. Etwa die Hälfte der Speisefischbestände in Nordatlantik, Nord- und Ostsee sind nach Angaben der Bundesforschungsanstalt für Fischerei übernutzt. Im Mittelmeer ist die Situation noch schlimmer. Darunter leiden nicht nur wir Verbraucher, sondern viel mehr noch Meeressäuger, die auf den Fisch angewiesen sind und nicht auf andere Nahrung ausweichen können.

Das belegt unter anderem die neue Studie eines internationalen Forscherteams unter Giovanni Bearzi, Gastprofessor an der Universität Venedig. Danach sind in der nördlichen Adria, wo Gruppen aus fünfzig bis siebzig Delfinen einst ein häufiger Anblick waren, heute mit viel Glück allenfalls noch vereinzelte Tiere anzutreffen. Der drastische Rückgang beruht dabei nicht auf dem unabsichtlichen Beifang der Säuger, dem üblicherweise die Schuld gegeben wird; vielmehr scheinen die Tiere schlicht zu verhungern, weil ihre Beute, vor allem Schwarmfische wie Anchovis sowie Sardinen und deren Verwandte, extrem rar geworden ist.

Schon seit Jahren plädieren Naturschützer und einsichtige Politiker für verschärfte Fangquoten und die Einrichtung von Meeresschutzgebieten. Doch die Fischerei-Lobby verhindert immer wieder die notwendigen Maßnahmen. So subventioniert die Europäische Union weiterhin die Überfischung durch Steuergelder in Millionenhöhe.



Vom Aussterben bedroht: der Gemeine Delfin

**Immerhin gibt es Lichtblicke.** Pläne zur Einrichtung von Meeresschutzgebieten liegen bereits fertig ausgearbeitet vor und müssen nur noch umgesetzt werden. So will das italienische Umweltministerium die artenreichen Gewässer um Ischia unter Schutz stellen. Ob es sich damit innerhalb der Regierung durchsetzt, ist aber fraglich.

Hoffen lässt zudem das 2001 in Kraft getretene »Abkommen zum Schutz von Walen und Delfinen im Mittelmeer und im Schwarzen Meer«, das sieben vorwiegend osteuropäische Länder inzwischen unterzeichnet haben – allerdings fehlen Griechenland, Italien, Frankreich und die Türkei. Nicolas Entrup von der Whale and Dolphin Conservation Society Deutschland gibt sich dennoch optimistisch: »Die zweite Vertragsstaatenkonferenz im Herbst wird über einen Management-Plan zum Schutz des Gemeinen Delfins beraten.«

Das Credo der Umweltschützer, dass Ökologie und Ökonomie kein Gegensatz seien, mag manchmal überstrapaziert werden. Aber in der heutigen Krise der Fischerei trifft es fraglos zu. Muss erst der Delfin im Mittelmeer völlig ausgerottet sein, bis Fischereiwirtschaft und Politik das begreifen?

*Monika Rößiger*

Die Autorin ist Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Hamburg.

MATHEMATIK

# Abelpreis – Brückenschlag zwischen den Disziplinen

Die 2002 geschaffene Auszeichnung für eine besondere Leistung oder ein herausragendes Lebenswerk in Mathematik ging dieses Jahr an Michael Atiyah und Isadore Singer. Den Preisträgern gelang eine bedeutende Verbindung zwischen Analysis und Topologie.

Von Michael Joachim

Es gibt keinen Nobelpreis für Mathematik. Die Fields-Medaille bringt zwar ähnlich großen Ruhm, ist aber viel bescheidener ausgestattet als der Nobelpreis und wird im Gegensatz zu diesem nicht für ein Lebenswerk verliehen. Erst 2002 schloss die norwegische Regierung die Lücke, die Alfred Nobel gelassen hatte: Fortan soll die Niels-Henrik-Abel-Gedächtnisstiftung einmal im Jahr den mit 6 Millionen norwegischen Kronen (710 000 Euro) dotierten Abelpreis für hervorragende wissenschaftliche Leistungen im Fach Mathematik vergeben.

Während der Anlass zur Gründung dieser Stiftung der 200. Geburtstag des norwegischen Mathematikers Niels Henrik Abel (1802 – 1829) war, soll die neue Auszeichnung allgemein »dazu beitragen, das Ansehen der Mathematik in der Gesellschaft zu erhöhen«. Und so hoffen die Mathematiker, dass die Aufmerksamkeit der Welt sich in Zukunft ein zweites Mal im Jahr auf den europäischen Norden richten wird, nämlich immer dann, wenn im Sommer in Oslo der Abelpreis verliehen wird.

Der erste Laureat war im vergangenen Jahr Jean-Pierre Serre. Gewürdigt wurde er »für seine Verdienste um die Schaffung moderner Formen in vielen Bereichen der Mathematik, insbesondere der Topologie, der algebraischen Geometrie und der Zahlentheorie« (Spektrum der Wissenschaft Spezial Omega, 4/2003, S. 60).



ANNE LISE FLAVIK

In diesem Jahr nutzt die Stiftung die in den Statuten vorgesehene Möglichkeit, den Preis auf zwei oder mehrere Mathematiker aufzuteilen, die eng verwandte grundlegende Beiträge erbracht haben. Ausgezeichnet werden Michael F. Atiyah und Isadore M. Singer »für ihre Entdeckung und ihren Beweis des Indexsatzes, mit dem sie Topologie, Geometrie und Analysis verknüpfen, und für ihre herausragende Rolle beim Bau neuer Brücken zwischen der Mathematik und der theoretischen Physik«.

### Fruchtbare Begegnung

Singer, 1924 in Detroit geboren, promovierte an der Universität Chicago und kam 1950 zum Massachusetts Institute of Technology (MIT), wo er nun schon seit vielen Jahren Professor ist. Er beschäftigte sich zunächst mit der Operatortheorie, die man als eine natürliche Weiterführung und Spezialisierung der Analysis ansehen kann. Dass Singer im Frühjahr 1962 bei einem Gastaufenthalt in Oxford auf den fünf Jahre jüngeren Michael Atiyah traf, erwies sich als Glücksfall für die Mathematik.

Atiyah, 1929 in London geboren, hatte zuvor in Cambridge studiert und gelehrt, war gerade frisch von dort nach Oxford gekommen und arbeitete eigentlich auf einem ganz anderen Gebiet als Singer. In den ersten Jahren seiner ▷

◁ Erhielten den diesjährigen Abelpreis für die Entdeckung und den Beweis eines Satzes, der Topologie, Geometrie und Analysis verknüpft und Brücken zur Physik schlägt: Michael F. Atiyah (links) und Isadore M. Singer (rechts).

# Der Indexsatz von Atiyah und Singer

**Die moderne Analysis** beschäftigt sich zwar immer noch mit Funktionen wie $f(x) = x^2 \sin(x)$, aber von einem sehr abstrakten Standpunkt: Nicht einzelnen Werten einer Funktion (Extremwerten, Wendepunkten, …) gilt das Interesse; vielmehr wird die ganze Funktion als ein einziger Punkt in einem abstrakten Raum aufgefasst. Funktionen mit ähnlichen Werten sind eng benachbarte Punkte in diesem Funktionenraum.

Generell lassen sich geometrische Begriffe auf Funktionenräume übertragen. Zum Beispiel kann man von »Geraden« in einem Funktionenraum sprechen, wenn bestimmte Mengen von Punkten, sprich Funktionen, Vielfache voneinander sind. Analog gibt es »lineare Abbildungen«, die Geraden wieder in Geraden überführen. Formal heißt eine Abbildung linear, wenn das Bild einer Summe von Funktionen gleich der Summe der Einzelbilder und das Bild eines Vielfachen einer Funktion das Vielfache des Bildes der Funktion ist ist. Ein besonders interessanter Spezialfall sind die linearen Differenzialoperatoren: Sie bilden eine Funktion auf ihre erste, zweite oder noch höhere Ableitung beziehungsweise auf eine Linearkombination dieser Ableitungen ab.

Ein Standardproblem der Analysis ist das Lösen einer Differenzialgleichung. Dabei geht es zum Beispiel darum, eine unbekannte Funktion f zu finden, welche die Gleichung $D(f)=0$ erfüllt, wobei D ein Differenzialoperator der gerade erläuterten Art ist. Man sucht also eine Funktion, das heißt einen Punkt f im Funktionenraum, der von der linearen Abbildung D in den Nullpunkt befördert wird.

In Räumen aus herkömmlichen Punkten gilt: Wenn eine lineare Abbildung auch nur einen Punkt, der nicht ohnehin der Nullpunkt ist, in den Nullpunkt überführt, dann lässt sie den ganzen Raum auf etwas »Dünneres«, sprich Niedrigdimensionaleres, zusammenschrumpfen. In einem solchen Fall liegen etwa die Bilder aller Punkte des dreidimensionalen Raums sämtlich auf einer (zweidimensionalen) Ebene oder einer (eindimensionalen) Geraden oder sogar im Nullpunkt. Alle anderen Punkte sind nicht Bildpunkte der Abbildung. Sie sind für sie gewissermaßen unerreichbar: Es gibt keinen Punkt des dreidimensionalen Raumes, den die Abbildung in einen Punkt außerhalb der Ebene (Geraden, …) überführen kann.

Über den vertrauten dreidimensionalen Raum hinaus gilt für Räume mit beliebig (aber endlich) vielen Dimensionen: Wenn eine lineare Abbildung in einem n-dimensionalen Raum k Dimensionen zu null macht, sind auch k Dimensionen für diese Abbildung unerreichbar.

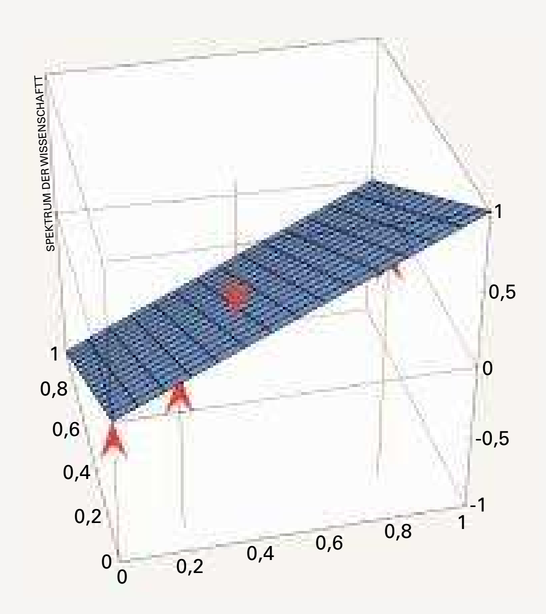
**Funktionenräume sind im Allgemeinen allerdings** unendlich-dimensional und die Verhältnisse daher etwas komplizierter. So vernichtet der Differenzialoperator $D(f)=f''$ zwar zwei Dimensionen, nämlich alle Funktionen der Form $f(x)=ax+b$, deren zweite Ableitung $f''$ gleich null ist. Aber es gibt keine Funktion, die für ihn unerreichbar wäre; denn jede Funktion lässt sich als zweite Ableitung einer anderen ausdrücken.

In einem unendlich-dimensionalen Funktionenraum können – im Unterschied zum endlich-dimensionalen Raum – also die Dimension des durch einen Differenzialoperator zu null gemachten Teilraums – in unserem Beispiel 2 – und diejenige des unerreichbar gewordenen Teilraums – im hier betrachteten Fall 0 – verschieden voneinander sein. Die Differenz zwischen beiden bezeichnet man als analytischen Index des Differenzialoperators. Diese Differenz kann allerdings nur dann gebildet werden, wenn die Dimensionen der beiden Teilräume endlich sind. Bei unserem Operator $D(f) = f''$ ist diese Bedingung erfüllt, und der analytische Index hat, wie gezeigt, den Wert 2.

**Die geläufigsten Funktionen** hängen von einer reellen Variablen ab. Die Gesamtheit der reellen Zahlen kann man aber auch als Linie, das heißt als ein geometrisches Gebilde auffassen. Und statt Funktionen, die auf einer Linie definiert sind, kann man auch Funktionen auf komplizierteren geometrischen Objekten (Mannigfaltigkeiten) studieren – etwa einem Kreis oder Torus. Auch in diesen Fällen lässt sich der analytische Index eines Differenzialoperators definieren; er ist allerdings viel schwieriger zu berechnen.

Mit geometrischen Methoden kann man einem solchen Differenzialoperator aber noch eine weitere ganze Zahl zuordnen, den »topologischen Index«. Dieser ist vergleichsweise schwer zu definieren, sodass ich es hier gar nicht versuchen möchte. Er ist aber weitaus besser berechenbar, und die Geometrie der zu Grunde liegenden Mannigfaltigkeit geht wesentlich mit ein. Viele nützliche Eigenschaften des topologischen Index folgen direkt aus seiner Definition.

Der Indexsatz von Atiyah und Singer besagt nun, dass diese beiden Indizes übereinstimmen. Zudem enthält er die Indexformel der zwei Mathematiker, die angibt, wie man den topologischen Index aus gut verfügbaren geometrischen Daten explizit berechnen kann.




**Die lineare Abbildung $A(x,y,z)=(x,y,x-y)$ überführt jeden Punkt $(x,y,z)$ des dreidimensionalen Raums in einen Punkt der Ebene, die durch $z=x-y$ definiert ist. Punkte außerhalb dieser Ebene kann sie somit nicht darstellen – diese bleiben für sie unerreichbar.**

akademischen Laufbahn hatte er sich mit algebraischer Geometrie beschäftigt, einem Teilbereich der Mathematik, in dem man (grob gesprochen) Eigenschaften der Lösungsmengen von Polynomen untersucht. Solche Lösungsmengen kann man sich auch als geometrische Objekte vorstellen; so entspricht die Lösungsmenge der Gleichung $x^2 - y = 0$ einer Parabel in der Ebene.

Eine besonders abstrakte Weise, geometrische Objekte zu studieren, ist die Topologie. Atiyah hatte schon, teilweise zusammen mit Friedrich Hirzebruch aus Bonn, einige wichtige Resultate und Konzepte aus der algebraischen Geometrie in die Topologie übertragen können; und nachdem Hirzebruch den so genannten Signatursatz bewiesen hatte, lag es nahe, nach einer Aussage wie der des Indexsatzes zu suchen (siehe Kasten links). Doch war abzusehen, dass dafür raffiniertere Methoden der Geometrie und der Analysis benötigt würden.

**Wäre die Wendeltreppe auf dieser Lithografie von Maurits Cornelis Escher (»Treppauf und Treppab«) topologisch äquivalent zur reellen Zahlengeraden, also unendlich lang und nicht in sich selbst zurücklaufend, ergäbe sich kein Widerspruch zur Realität. Das Paradoxon entsteht erst dadurch, dass der Weg der Ritter topologisch ein Kreis ist. Mit dem topologischen Index lässt sich dieser Unterschied ohne Rückgriff auf die konkrete Form der Treppe ausdrücken.**

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

### Im- und Export von Erkenntnissen

Eben über solche Kenntnisse verfügte Singer. Schon ein halbes Jahr nach ihrer ersten Begegnung, also im Herbst 1962, hatten sie ihren Indexsatz und einen Beweis dafür gefunden. Damit war eine wichtige Brücke zwischen Topologie und Geometrie einerseits und Analysis andererseits geschlagen. Viele bekannte Aussagen wie die Gauß-Bonnet-Formel, der Satz von Hirzebruch-Riemann-Roch und der Signatursatz erwiesen sich nun als Spezialfälle des neuen Indexsatzes.

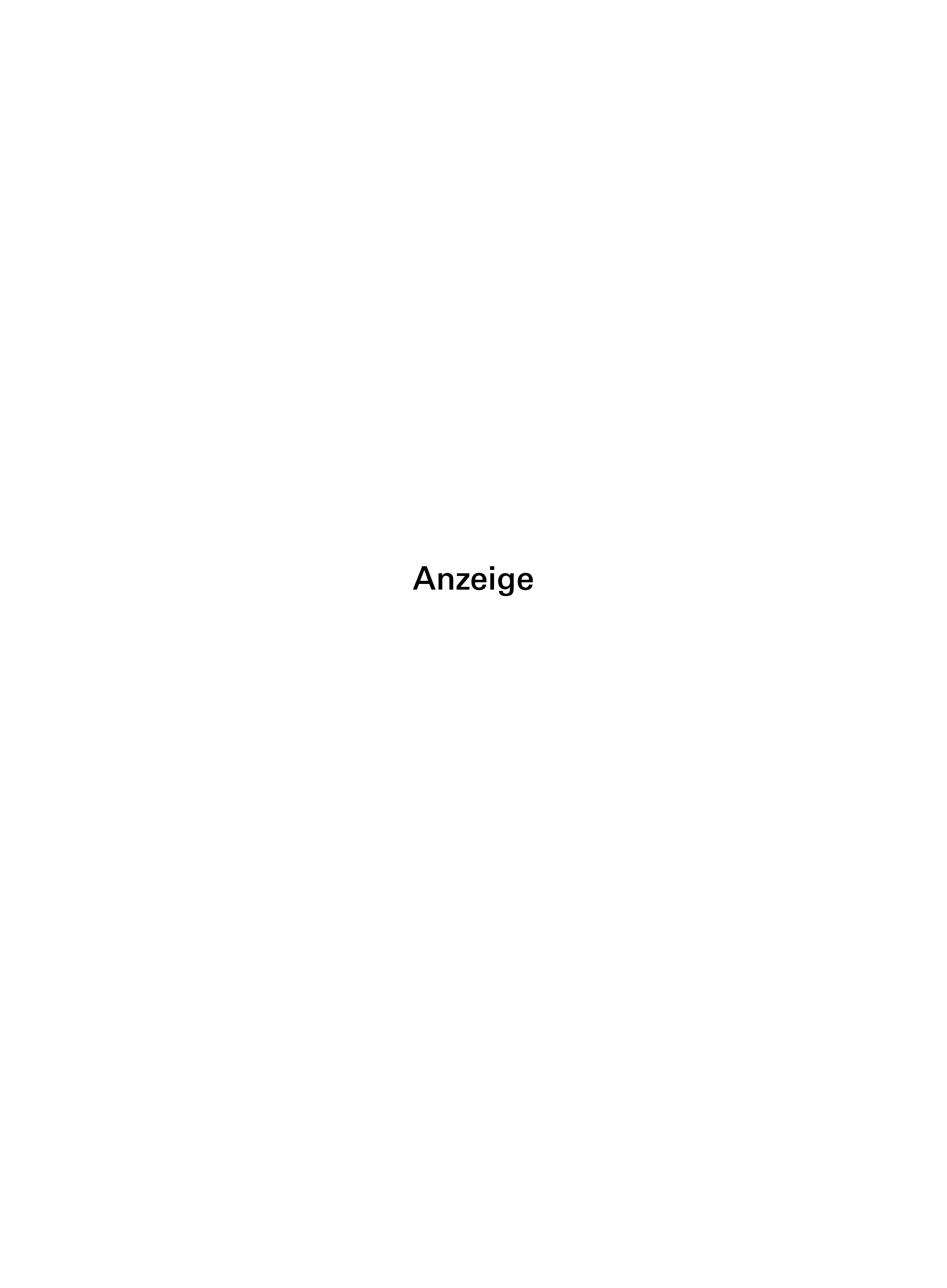
Fortan diente die Brücke dazu, Erkenntnisse aus einem Teilbereich der Mathematik in den jeweils anderen zu übertragen. Atiyah und Singer bauten die Theorie um den Indexsatz weiter aus, bewiesen wichtige Varianten – wie das Familienindextheorem oder das Atiyah-Patodi-Singer-Theorem – und schufen damit schließlich ein neues Arbeitsgebiet innerhalb der Mathematik, das auch heute noch von maßgeblicher Bedeutung ist.

Ende der 1970er Jahre gerieten diese Ergebnisse ins Blickfeld der theoretischen Physiker. Es stellte sich heraus, dass man mit ihrer Hilfe Phänomene in der Quantenphysik erklären kann, insbesondere im Bereich der Eichtheorie und der durch die Quantisierung begründeten Theorie der Anomalien. Für Atiyah und Singer kamen diese Anwendungen zunächst völlig unerwartet.

In der Folgezeit pflegten beide einen regen Austausch mit den theoretischen Physikern. Dabei wurden verschiedene moderne Konzepte der Mathematik in die Nachbardisziplin importiert; andererseits avancierten physikalisch motivierte Themengebiete zu bedeutenden Gegenständen aktueller mathematischer Forschung. Dazu gehörte zum Beispiel die Eichtheorie. Mit ihrer Hilfe gelang Simon K. Donaldson, einem Schüler Atiyahs in Oxford, Anfang der 1980er Jahre ein mathematischer Durchbruch in der Klassifikation der vierdimensionalen Mannigfaltigkeiten.

Atiyah und Singer sind für ihre Verdienste schon vielfach geehrt worden. So erhielt Singer 1969 den Bôcher-Preis und 2000 den »Steele Prize for Lifetime Achievement« der Amerikanischen Mathematischen Gesellschaft. Atiyah wurde 1966 mit der Fields-Medaille ausgezeichnet. Der Abelpreis, den beide am 25. Mai in Empfang nehmen durften, bildet nunmehr den krönenden Abschluss ihres beeindruckenden mathematischen Werdegangs. ◁

**Michael Joachim** ist Privatdozent für Mathematik in Münster und derzeit wissenschaftlicher Mitarbeiter am Sonderforschungsbereich »Geometrische Strukturen in der Mathematik«.


Anzeige

UMWELT

# Katastrophe in Raten

**Eine neue Studie dokumentiert am Beispiel der Exxon-Valdez-Havarie vor 15 Jahren die schädlichen Langzeitwirkungen einer Ölpest.**

Von Michael Springer

Nur zu oft werden wir mit schockierenden Bildern von Ölteppichen und fettig-schwarzen Stränden konfrontiert – zuletzt nach der Havarie des Tankers »Prestige« im November 2002 vor der Nordwestküste Spaniens. Damals liefen 47 000 Tonnen Schweröl aus, 30 000 weitere Tonnen sanken mit dem Wrack und lauern seither als ökologische Zeitbombe in 4000 Meter Tiefe.

Solche spektakulären Unglücksfälle, durch die Medien augenblicklich verbreitet, lösen hektische Aktivitäten aus. Umwelt- und Katastrophenschützer eilen herbei, die Regierung verspricht Unterstützung für örtliche Fischer und Hoteliers, Vorwürfe und Forderungen an die Verursacher und Behörden werden laut.

## Ölpest ohne Langzeitschäden?

Bald aber erlahmt das öffentliche Interesse, und schließlich wird Entwarnung gegeben. Ein Vierteljahrhundert, nachdem sich aus der »Amoco Cadiz« vor der bretonischen Küste 230 000 Tonnen Öl ins Meer ergossen, gilt die Umwelt dort als fast völlig gesundet. Offenbar ist die Natur unter günstigen Bedingungen – die »Amoco Cadiz« transportierte leichte Ölsorten, die örtliche See wird vom Golfstrom erwärmt – mit der Zeit fähig, selbst riesige Schadstoffmengen zu verkraften.

Ähnlich glimpflich scheint bei oberflächlicher Betrachtung auch die Havarie der »Exxon Valdez« vor Alaska ausgegangen zu sein. Im März 1989 ergossen sich aus dem Bauch des gestrandeten Riesentankers 42 Millionen Liter Rohöl in den Prince William Sound. Der akute Umweltschaden war gewaltig – ebenso der drohende Imageverlust für den Konzern Exxon Mobil, der darum rasch eine gigantische, unter Ökologen umstrittene Säuberungsaktion startete: Die Küsten wurden mit heißem Wasser unter Hochdruck abgespritzt und anschließend gedüngt, um das Wachstum ölfressender Mikroben anzuregen (Spektrum der Wissenschaft 12/1991, S. 74).

Bis heute wehrt der Konzern Schadenersatzansprüche von tausenden Fischern ab. Er verweist auf die optisch wiederhergestellte Landschaft und preist die robuste Gesundheit der Natur. Zwar könnten Ölteppiche, so Exxon Mobil 2001 in einer Presseaussendung, kurzfristig negative Effekte haben, aber die Umwelt verfüge über beachtliche Selbstheilungskräfte. Einen Langzeitschaden durch das ausgelaufene Öl gebe es nicht.

Ein ganz anderes Bild zeichnet dagegen eine umfangreiche Studie, welche Charles Peterson vom Institute of Marine Sciences der Universität von North Carolina in Chapel Hill zusammen mit sieben anderen Forschern aus den USA und Kanada kürzlich veröffentlicht hat *(»Science«, Bd. 302, S. 2082)*. Darin wird kritisiert, dass bisherige Untersuchungen nur akute Kurzzeiteffekte auf einzelne Spezies betrachtet hätten, nicht aber die vielfältige Wechselwirkung zwischen den biologischen und abiotischen Komponenten des gesamten Ökosystems.

Das Massensterben von tausenden Meeressäugern und hunderttausenden Seevögeln in den ersten Tagen der Ölpest war demnach erst der Anfang. Der ▷

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

**Aus dem Tankschiff »Exxon Valdez« ergossen sich 1989 etwa 42 Millionen Liter Erdöl in den Prince William Sound vor Alaska. Die verschmutzten Küsten wurden unter anderem mit Heißwasser unter Hochdruck abgespritzt. In Geröllnischen blieben aber Ölreservoirs, die bis heute Umweltgifte absondern.**

▷ zunächst zügige natürliche Abbau und Abtransport des angeschwemmten Öls verlangsamte sich bald; in Geröllnischen entstanden unzählige unterirdische Ölreservoirs, die bis heute Umweltgifte absondern und die Mortalität der Fische erhöhen.

### Schleichende Verseuchung

Muscheln und Krabben nehmen die im Wasser suspendierten Kohlenwasserstoffe auf und speichern sie in ihrem Gewebe, das den Seeottern als Nahrung dient und sie schleichend vergiftet. Auch Seevögel zeigen eine deutlich erhöhte Sterblichkeit, wenn sie auf den ölverseuchten Inseln überwintern; denn über Jahre akkumulieren sich kleine Schadstoffmengen im Organismus, schwächen die Gesundheit, hemmen Wachstum und Fortpflanzung.

Im Detail analysiert die Studie mehrere Kaskaden indirekter Effekte, die sich oft erst nach Jahrzehnten bemerkbar machen. Wenn die Ölpest beispielsweise, wie in Alaska geschehen, die auf überspülten Küstenfelsen gedeihende Alge *Fucus gardneri* ausrottet, etabliert sich ein Teufelskreis, an dem ein ganzes Habitat mit all seinen Bewohnern und Nutznießern zu Grunde geht. Ein anderes Beispiel ist das auf Seetang (Kelp) beruhende marine Ökosystem: Weil die Killerwale im Golf von Alaska nicht mehr genug Meeressäuger als Beute vorfinden, jagen sie ersatzweise Seeottern, die deshalb die Seeigel-Population nicht mehr ausreichend dezimieren; diese verzehren dadurch zu viel Kelp und entziehen so einem wichtigen Habitat für Fische und Wirbellose die Grundlage.

Als Konsequenz ihrer Studie plädieren die Autoren für eine gründlich geänderte Sicht auf die Folgen einer Ölpest: Das Öl wirkt nicht nur ein paar Tage lang akut toxisch, erstickend und verklebend. Selbst in geringen Mengen schwächt es über Jahre hinweg einzelne Spezies und vernichtet ganze Ökotope. Brachiale Säuberungsaktionen, bei denen die zähe schwarze Masse einfach abgespült und nicht wirklich beseitigt wird, sind reine Kosmetik und richten oft mehr Schaden an als das Öl selbst. ◁

**Michael Springer** ist ständiger freier Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.

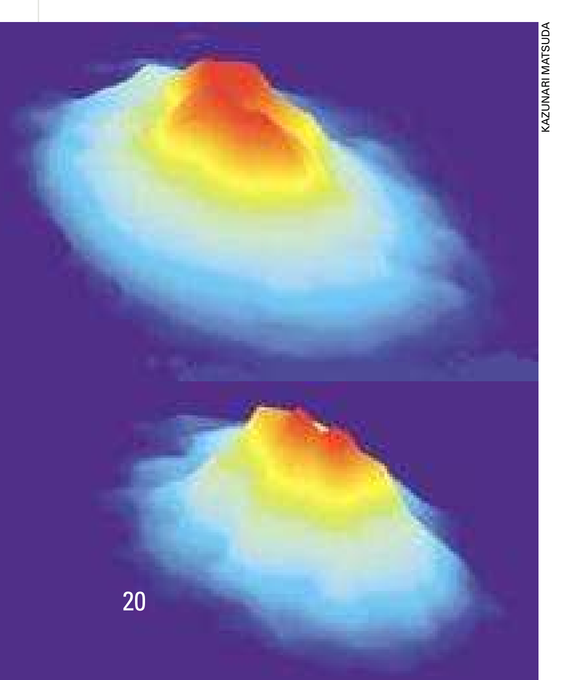
HALBLEITERPHYSIK

# Erregtes Paar in Nahaufnahme

Mit einer dünnen Glasspitze ist es erstmals gelungen, ein Exziton, den Grundbaustein der modernen Elektronik, direkt sichtbar zu machen.

Von Stefan Maier

Es treibt sich in jedem CD-Spieler, in Leuchtdioden und vielleicht auch in den Quantencomputern der Zukunft herum. Dennoch ist der Name dieses spukhaften Gebildes, das die Grundlage der modernen Halbleiterelektronik bildet, außerhalb der Fachwelt kaum bekannt. Ich darf vorstellen: das Exziton. Allerdings währt sein Auftritt in der Regel nur kurz. Wenige millionstel Sekunden nach seiner Geburt fällt es schon wieder in sich zusammen. Als »Todesschrei« sendet es dabei einen Lichtblitz mit genau festgelegter Wellenlänge aus. Exzitonen eignen sich daher ideal zur Herstellung winzig kleiner Laser – etwa zum Abspielen von Compact Discs oder für die Lichtstrahlen von Laserpointern.



KAZUNARI MATSUDA

◁ Bergartige Strukturen veranschaulichen die gemessene Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Exzitons (oben) und eines Bi-Exzitons (unten) im Innern eines Quantenpunktes. Das Exziton beansprucht mehr Platz, weil es wegen seiner kleineren Masse beweglicher ist.

### Vereinigung mit Lichtblitz

Obwohl die moderne Elektronik ohne die flüchtigen Teilchen undenkbar wäre, hat niemand sie bisher zu Gesicht bekommen. Sie sind nämlich nicht nur kurzlebig, sondern auch winzig. Ein Exziton besteht schlicht aus einem freien, negativ geladenen Elektron und dessen positiv geladenem Gegenstück: einem »Loch«. Dieses ist im Valenzband des Halbleiters zurückgeblieben, nachdem sich das Elektron in das Leitungsband davongemacht hat. Loch und Elektron können wandern, bleiben wegen ihrer gegensätzlichen Ladung aber aneinander gebunden und ziehen sich an. Wenn sie sich nahe genug kommen, umkreisen sie sich in einer Art Paarungstanz. Nur Sekundenbruchteile später – nach wenigen Tanzschritten – kommt es zur Vereinigung: Das Loch im Valenzband wird gefüllt, und ein Lichtblitz besiegelt das Ende des Exzitons.

Diese Blitze ließen sich auch bisher schon wahrnehmen, aber nur ziemlich verschwommen. Das hängt damit zusammen, dass auf Linsen und Lichtstrahlen basierende Mikroskope dem Beugungslimit der Optik unterliegen. Deshalb können sie Objekte, die viel kleiner als die Wellenlänge des verwendeten Lichtes sind, nicht auflösen. Doch Kazunari Matsuda und seinen Kollegen an der Kanagawa-Akademie für Wissenschaften und Technologie in Kawasaki ist es mit diversen Kunstgriffen nun gelungen, diese Beschränkung zu umgehen und einzelne Exzitonen über ihr finales Aufleuchten erstmals genauer zu vermessen *(Physical Review Letters, Bd. 91, S. 177401)*.

Als Erstes überlegten sich die Wissenschaftler, wie sie die Teilchen in kontrollierter Weise erzeugen und für die Beobachtung festhalten könnten. Dazu schufen sie mit einem komplizierten Kristallwachstumsverfahren auf der Oberfläche eines Halbleitermaterials winzige »Tafelberge« aus Galliumarsenid, die sich nur um wenige Atomlagen über ihre Umgebung erhoben und Durchmesser von

etwa hundert Nanometern hatten. Diese inselartigen Erhöhungen bildeten so genannte Quantenpunkte – ideale Käfige für Exzitonen.

Die Erzeugung der Elektron-Loch-Paare ist im Prinzip sehr einfach: Beleuchtung des Chips mit rotem Laserlicht genügt. In diesem speziellen Fall allerdings mussten die Forscher mehr Aufwand treiben, wollten sie doch Exzitonen nur in einem einzelnen Quantenpunkt und nicht in der ganzen Galliumarsenid-Schicht anregen. Ein gewöhnlicher Laserstrahl kam da als Lichtquelle nicht in Frage, weil er – wiederum wegen des Beugungslimits – nicht eng genug fokussiert werden konnte. Das japanische Team benutzte daher eine Glasfaser, der es durch Ätzen mit Flusssäure zu einer extrem feinen Spitze verholfen hatte.

### Beobachtung im Käfig

Diese war mit rund zwanzig Nanometer Durchmesser nur etwa ein Fünftel so breit wie der Quantenpunkt. Damit hatten die Forscher das Beleuchtungsproblem gelöst: Sie speisten einen roten Laserstrahl in die Faser ein und brachten sie dicht über den Quantenpunkt. Mit einem kurzen Laserblitz von nur wenigen Mikrowatt erzeugten sie dann jeweils ein Exziton. Wenn dieses schließlich in sich zusammenfiel, sammelten sie den resultierenden Lichtblitz mit derselben Glasfaser ein – eine wahrlich elegante Methode.

Die japanischen Physiker wiederholten diesen Versuch unzählige Male und ermittelten für jede Position der Spitze auf dem Quantenpunkt, wie oft sich das Exziton gerade dort vereinigte. So erhielten sie schließlich eine Karte, welche die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens an den verschiedenen Stellen seines inselartigen Käfigs zeigt. Diese Karte lieferte aber zugleich ein Porträt des Exzitons. Nach den Gesetzen der Quantenmechanik ist sie nämlich nichts anderes als das Quadrat der Wellenfunktion, durch die das subatomare Teilchen vollständig charakterisiert wird.

Auf dem Porträt erkennt man einen kleinen Berg, dessen Gipfel im Zentrum des Quantenpunktes liegt. Die Breite dieser Erhebung zeigt gewissermaßen an, wie weit sich die Exzitonen während ihres kurzen Daseins vom Ort ihrer Entstehung entfernen können.

Schon diese einfache Sichtweise erklärt übrigens einen zusätzlichen Be- ▷

▷ fund der japanischen Wissenschaftler. Sie untersuchten die Elektron-Loch-Paare nämlich nicht nur einzeln, sondern auch im Doppelpack. Bei den Bi-Exzitonen erhielten sie einen schmaleren und steileren Berg für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit. Das erscheint logisch, da die Doppelpaare eine größere Masse haben als die einfachen Exzitonen und sich deshalb innerhalb ihrer Lebenszeit nicht so weit vom Zentrum des Quantenpunktes entfernen können.

Nach diesem Erfolg ruhen sich Matsuda und seine Kollegen keineswegs auf ihren Lorbeeren aus. Vielmehr basteln sie schon an komplizierteren Anordnungen von Quantenpunkten und anderen Halbleiterstrukturen, die sie dann mit ihrer Abbildungsmethode untersuchen wollen. Ihr Fernziel ist es, die Eignung dieser Gebilde für die Darstellung und Verarbeitung von Quantenbits auszuloten: den Grundeinheiten zukünftiger Quantencomputer. Doch jetzt schon werden Studenten froh sein, sich endlich ein Bild vom unanschaulichen Exziton machen zu können. ◁

**Stefan Maier** ist promovierter Physiker und forscht am California Institute of Technology in Pasadena.

NACHGEHAKT

## Wie knapp ist das Öl?

**Der Ölpreis erreichte Anfang Juni Rekordwerte.** Tankstellenpächter spürten Kaufzurückhaltung an den Zapfsäulen, sogar die globalen Aktienmärkte notierten branchenübergreifend schwächer. Der Trend zur Verteuerung des wichtigsten Energieträgers scheint unaufhaltsam. Auf einmal wird allenthalben die prinzipielle Frage debattiert, wie lange das schwarze Lebenselixier der Weltwirtschaft überhaupt noch reichen kann.

An Stelle einer eindeutigen Antwort erschallt aus der Scientific Community ein recht undeutliches Stimmengewirr, das sich grob nach Berufen ordnen lässt: Während Ökonomen sich als notorische Optimisten profilieren, neigen Geowissenschaftler zu konservativen, das heißt eher pessimistischen Schätzungen. So prognostiziert der angesehene Erdölgeologe Colin J. Campbell, schon gegen Ende unseres Jahrzehnts werde die jährliche Weltölproduktion bei 25 Milliarden Barrel ihren Höhepunkt erreichen und danach wegen beginnender Erschöpfung der Vorräte bis 2050 ziemlich steil auf rund ein Viertel abfallen.

Gegen solche Prognosen opponiert ein Mann der Erdölwirtschaft ganz entschieden: Leonardo Maugeri, beim italienischen Energiekonzern Eni zuständig für die Firmenstrategie, hält Campbell genüsslich vor, der habe seine Schätzung der letztlich gewinnbaren Ressourcen mit den Jahren immer wieder nach oben korrigieren müssen *(Science, 21. 5. 2004, S. 1114)*. Weil Geologen wie Campbell auf stoffliche Mengen statt ökonomische Güter fixiert seien, entginge ihnen das Phänomen des »Reservenwachstums«. Durch technische Fortschritte seien die Erschließungskosten pro Barrel Öl dramatisch gesunken: von gut zwanzig Dollar im Jahr 1980 auf weniger als sechs Dollar für 2000. Damit würde das Erschließen immer neuer Lagerstätten wirtschaftlich rentabel.

Doch auch Maugeri räumt ein, dass Neuerschließungen nur ein Viertel dessen ersetzen, was die Welt pro Jahr konsumiert. Das habe jedoch ökonomische Ursachen: Länder wie Saudi-Arabien und Irak beuteten lieber wenige »alte« Felder immer weiter aus als auf den vielen neu entdeckten die Förderung aufzunehmen; und das kurzsichtige Starren auf den eigenen Aktienwert verführt die Ölfirmen dazu, ihre sicheren Reserven überzubewerten statt langfristig in Neuerschließungen zu investieren.

Wer dem dissonanten Chor der Experten lauscht, hört eine wiederkehrende Grundmelodie heraus: Nicht das Öl geht derzeit zur Neige, wohl aber das billige Öl. Bei einem jährlichen Weltbedarf von 30 Milliarden Barrel und geschätzten sicheren Reserven von 1,2 Billionen Barrel reichen die gesicherten Vorräte noch vierzig Jahre. Da bis 2012 mit einer Steigerung des Bedarfs um fünfzig Prozent zu rechnen ist, wenn etwa Inder und Chinesen in zunehmendem Maße auf Autos umsteigen, sinkt der Zeithorizont der Erdölwirtschaft allerdings auf unter dreißig Jahre.

Mehrere Jahrzehnte sind für Ökonomen eine Ewigkeit, für Geologen aber nur ein Augenblick. Historiker denken eher in Jahrhunderten; für sie sind dreißig Jahre eine geschichtliche Episode.

**»Die Ära der auf Erdöl basierenden Weltwirtschaft geht zu Ende«**

Selbst wenn neue Entdeckungen geologischer wie technologischer Art dem schwarzen Gold noch einen zusätzlichen Aufschub von einigen Jahrzehnten verschaffen – historisch betrachtet neigt sich die Ära einer erdölbasierten Weltwirtschaft unwiderruflich dem Ende zu.

**Die brisante Lage im Nahen Osten** gibt einen Vorgeschmack auf drohende globale Verteilungskämpfe um das knapper werdende Gut. Höchste Zeit, die Weltwirtschaft mit allen energietechnischen Mitteln von ihrer Ölabhängigkeit zu lösen. Wenn ein Kommentar zum steigenden Ölpreis mit »Sparen statt verbrauchen« betitelt ist (FAZ vom 1. 6.) – obgleich die Ermahnung sich hier nur an die anderen richtet, nämlich die USA –, wächst die Hoffnung, dass dieser Ölpreisschock ein heilsamer sein könnte. Zum Thema Energiesparen – nicht nur beim Benzinverbrauch – haben Wissenschaft und Technik eine ganze Menge ungenutzter Ressourcen anzubieten.

*Michael Springer*

**Noch sprudeln die Ölquellen. Doch wie lange die Vorräte reichen, ist unter Experten umstritten.**

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

# Mit Viren gegen Krebs

Tumoren zerstören, ohne gesunde Zellen zu schädigen: Die Virotherapie könnte diesen lange gehegten Wunschtraum der Medizin wahr machen.

TERESE WINSLOW

Adenoviren eignen sich besonders gut zur Virotherapie gegen Krebs. Hier brechen sie, nachdem sie sich zahlreich vermehrt haben, aus einer zerberstenden Krebszelle hervor und können weitere Tumorzellen befallen.

Von Dirk M. Nettelbeck und David T. Curiel

Die raffinierten Geschöpfe suchen sich genau aus, welche Zellsorten im Körper sie befallen und dadurch meist zu Grunde richten. So winzig – und oft nicht ungefährlich – Viren sind: Mediziner möchten sie nutzen, um mit ihrer Hilfe Krebszellen auszurotten.

Denn Viren sind Experten darin, Zellen zu manipulieren. Sie bestehen praktisch nur aus einer Hülle mit einer Mindestmenge genetischen Materials darin. Um sich zu vervielfältigen, müssen sie die Produktionsmaschinerie der infizierten Zellen missbrauchen. Bei manchen Virusarten schnüren sich dann die neuen Partikel in kleinen Membranbläschen von der Wirtszelle ab. Bei anderen platzt die mit Viren angefüllte Zelle schließlich. Tausende neuer Erreger schwärmen aus und suchen sich neue Zellen – während der erste Wirt erschöpft zu Grunde geht. Auf diese Weise lösen Viren zahlreiche Krankheiten aus, vom Schnupfen bis zu Aids.

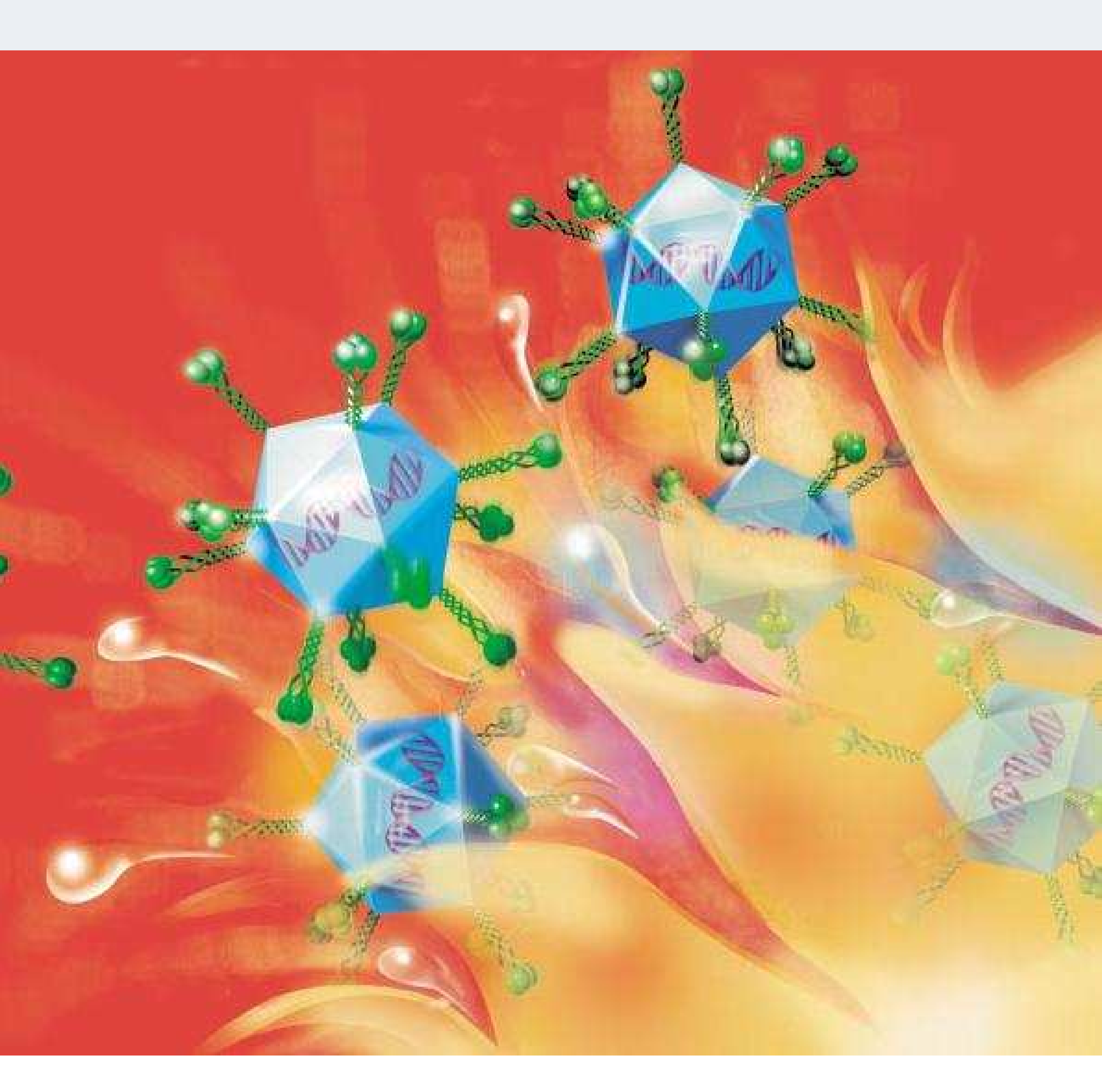
Die Winzlinge erkennen die für sie geeigneten Zelltypen jeweils an spezifischen Oberflächenmolekülen, so genannten Rezeptoren – sozusagen dem »Schloss«. Dort müssen sie andocken, bevor sie in die Zelle eindringen – sie benötigen also den passenden »Schlüssel«. Nicht nur die einzelnen Virusfamilien weisen unterschiedliche Erkennungsstrukturen auf, auch die verschiedenen Zelltypen in unserem Körper tragen außen jeweils besondere Merkmale. Beispielsweise bevorzugen Hepatitisviren Leberzellen und HI-Viren Immunzellen.

Wenn es gelingt, Viren auf Krebszellen als einziges Angriffsziel umzulenken oder ihnen – vielleicht auch zusätzlich – eine tödliche Fracht aufzuladen, die dann nur in Krebszellen verheerend wirkt, würden gesunde Zellen verschont. Die gentechnisch manipulierten Erreger könnten vor allem auch Metastasen gezielt aufspüren und zerstören, also abgesiedelte Krebszellen, die neue Tumoren bilden. Viele der gefürchteten, die Behandlung begrenzenden Nebenwirkungen einer konventionellen Krebstherapie blieben aus.

## Vom Feind zum Freund

Zahlreiche Wissenschaftlergruppen an Universitäten bis zur Industrie, darunter auch unsere beiden Teams, entwickeln inzwischen gentechnisch veränderte, so genannte »onkolytische Viren«, die bei Krebs eine solche »Virotherapie« oder »virale Onkolyse«, wie wir sagen, ermöglichen sollen. Die einzelnen Labors versuchen sich dazu an einer ganzen Palette von Erregern aus verschiedenen Virusfamilien. Tierversuche verliefen schon erfolgreich. Auch klinische Studien mit Krebspatienten finden bereits statt.

Die Forscher erproben nicht nur die reine Virotherapie, bei der die therapeutischen Erreger selbst Krebszellen selektiv töten sollen – entweder indem sie ausschließlich an Tumorzellen andocken oder weil sie ihr Reproduktionsprogramm nur in diesen starten können. Vermehrungsfähige Viren könnten auch als Genfähren herhalten, zum Beispiel um mit konventionellen Zytostatika ausschließlich auf entartete Zellen zu zielen. Durch das therapeutische Genprodukt würden Vorstufen der Zellgifte dann nur in Krebszellen umgewandelt. Des Weiteren wird daran gearbeitet, onkolytische Viren mit fluoreszierenden oder radioaktiven Substanzen zu markieren, um sie im Körper verfolgen zu können.



Versuche, Krebs mit Viren zu bekämpfen, gab es schon früher. Eine der ersten Beobachtungen, dass die kleinen Erreger sich dazu eignen könnten, machte im Jahr 1912 ein italienischer Gynäkologe: Nach Impfung mit einem abgeschwächten Tollwutvirus bildete sich der Gebärmutterhalskrebs einer Patientin zurück. In therapeutischer Absicht injizierten Ärzte Krebskranken erstmals Ende der 1940er Jahre Viren. Die Behandlungen hatten allerdings nur in wenigen Einzelfällen Erfolg. Zwanzig Jahre später bemerkten Wissenschaftler, dass der Erreger der für Vögel oft tödlichen Newcastle-Krankheit – der atypischen Geflügelpest, die beim Menschen Bindehautentzündung hervorruft – besonders Tumorzellen infiziert. Um diese Neigung zu verstärken, züchteten sie das Virus nun generationenlang mit menschlichen Tumorzellen. Neuerdings werden die auf Krebszellen gedrillten Viren wieder an Patienten erprobt.

In der medizinischen Literatur tauchten auch immer wieder Berichte über Krebsheilungen nach einer Virusinfektion auf. So vermerkten in den 1970er und 1980er Jahren zwei Ärzteteams, dass sich bei einigen Patienten nach einer Maserninfektion maligne Lymphome zurückgebildet hätten.

Kritische Stimmen äußerten jedoch, diese Viren könnten die beobachtete Wirkung gegen Krebs höchstens indirekt erzeugt haben, indem sie nämlich ganz ▷

allgemein die Abwehrkräfte des Immunsystems stimulierten. Infolgedessen hätte es nun auch die entarteten Zellen schärfer ins Visier genommen.

Das moderne Konzept einer Krebs-Virotherapie erarbeitet die Wissenschaft seit Ende der 1990er Jahre. Zwei amerikanische Forschergruppen – um Frank McCormick von Onyx Pharmaceuticals in Richmond und Daniel R. Henderson von Calydon in Sunnyvale (beides Kalifornien; Calydon wurde inzwischen von Cell Genesys in South San Francisco übernommen) – veröffentlichten damals unabhängig voneinander Erfolge damit, in Mäuse transplantierte menschliche Krebszellen gezielt mit Viren abzutöten.



**Die Viren sollen sich in Krebszellen vermehren und dann im Tumor verbreiten**

Beide Teams verwendeten gezielt abgewandelte so genannte »Adenoviren«. Für virusgestützte Krebstherapien nutzen Forscher auch mehrere andere modifizierte Virustypen, aber Adenoviren gehören zu den am besten geeigneten Kandidaten, weswegen auch wir sie bevorzugen. Diese Virusfamilie ist besonders gut erforscht. Molekularbiologie und Gentechnik arbeiten mit ihr seit Jahrzehnten, und diesen Viren verdanken wir bahnbrechende molekularbiologische Erkenntnisse.

Adenoviren gelten im Allgemeinen als wenig gefährlich. Die natürlichen Formen, die auf den Menschen spezialisiert sind, erzeugen meist die eher harmlosen Erkältungskrankheiten. In zahlreichen Studien zu Virotherapien mit vermehrungsfähigen Adenovirusvarianten ergaben sich tatsächlich keine schweren Risiken. Als jedoch vor fünf Jahren ein junger leberkranker Amerikaner an einer versuchten Gentherapie starb, bei der Adenoviren als Genfähre dienten, wurde zunächst Kritik laut. Heute wissen wir, dass dieser Mann wegen seines schlechten Befindens und einer stark eingeschränkten Leberfunktion zu dem Versuch nicht hätte zugelassen werden dürfen. Sein Immunsystem hatte auf die Viruslast unvorhergesehen heftig reagiert. Dies hatte sein geschwächter Organismus nicht verkraften können. Seitdem arbeiten die Forscher unermüdlich daran, noch sicherere Genfähren beziehungsweise Virotherapien zu entwickeln. Um Sicherungsmechanismen einzubauen, sind Adenoviren wegen des gründlichen Wissens über sie besonders zugänglich.

Viren für die Krebstherapie müssen andere Anforderungen erfüllen als Viren, die Ersatzgene zur Korrektur von Erbkrankheiten einschleusen sollen. Bei einer Genersatztherapie muss das neue Gen beständig sein, das heißt die Zelle möglichst auf Dauer »heilen«. Darum verwendet man dazu gern Virustypen, die ihr Erbgut – also auch die neue Fracht – ins Genom der Zellen fest einbauen, vor allem Retroviren. Diese Viren sollten sich aus Sicherheitsgründen nicht vermehren können.

Bei einer viralen Krebstherapie aber ist besonders wichtig, dass nur entartete Zellen infiziert beziehungsweise zumindest nur sie umgebracht werden. Denn diese Viren sollen ja tödlich wirken, allerdings exklusiv. Ein andauernder Gentransfer ist somit nicht erforderlich. Nach getaner Tat haben die therapeutischen Viren wieder zu verschwinden. Bis dahin aber sollten sich die Erreger bestenfalls kräftig vermehren und im Körper verbreiten, damit sie noch die winzigsten Krebsherde finden. Auch wenn ihnen neue Gene eingebaut wurden, welche die Tumoren vernichten helfen, also etwa für eine Chemotherapie spezifisch empfindlich machen, ist es wichtig, dass diese Eigenschaft gezielt weitergetragen wird.

Adenoviren pflanzen ihr Erbgut nicht in die Erbsubstanz der infizierten Zellen ein. Ihre eigenen wie auch mitgebrachte neue Gene bleiben nur vorübergehend aktiv und werden dann abgebaut beziehungsweise die Wirtszelle wird zerstört. Nach einiger Zeit können sie darum keinen Schaden mehr anrichten. Weiter ist vorteilhaft, dass das Erbgut dieser Viren, DNA, nicht sonderlich rasch mutiert. Das minimiert das Risiko, dass sie außer Kontrolle geraten. Viren mit der instabileren RNA als Träger der Erbinformation, wie HIV, werden wegen ihrer hohen Mutationsrate schnell gegen Medikamente resistent und entziehen sich auch immer wieder der Immunabwehr.

### Schlüssel nur für Rezeptoren auf Krebszellen

Adenoviren bergen ihr Erbgut in einer zwanzigflächigen Kapsel, dem Kapsid, an dessen insgesamt zwölf Ecken lang gestreckte Proteine hervorragen. Für diese Antennen, die während einer jahrtausendelangen Evolution optimiert wurden, interessiert sich die Virotherapie besonders, denn damit erkennt das Virus seinen Rezeptor – ein passendes Oberflächenmolekül auf einer Zelle, an dem es andockt. Die Antennen sind sozusagen die Schlüssel zu den Zellen, die das Virus spezifisch befallen kann.

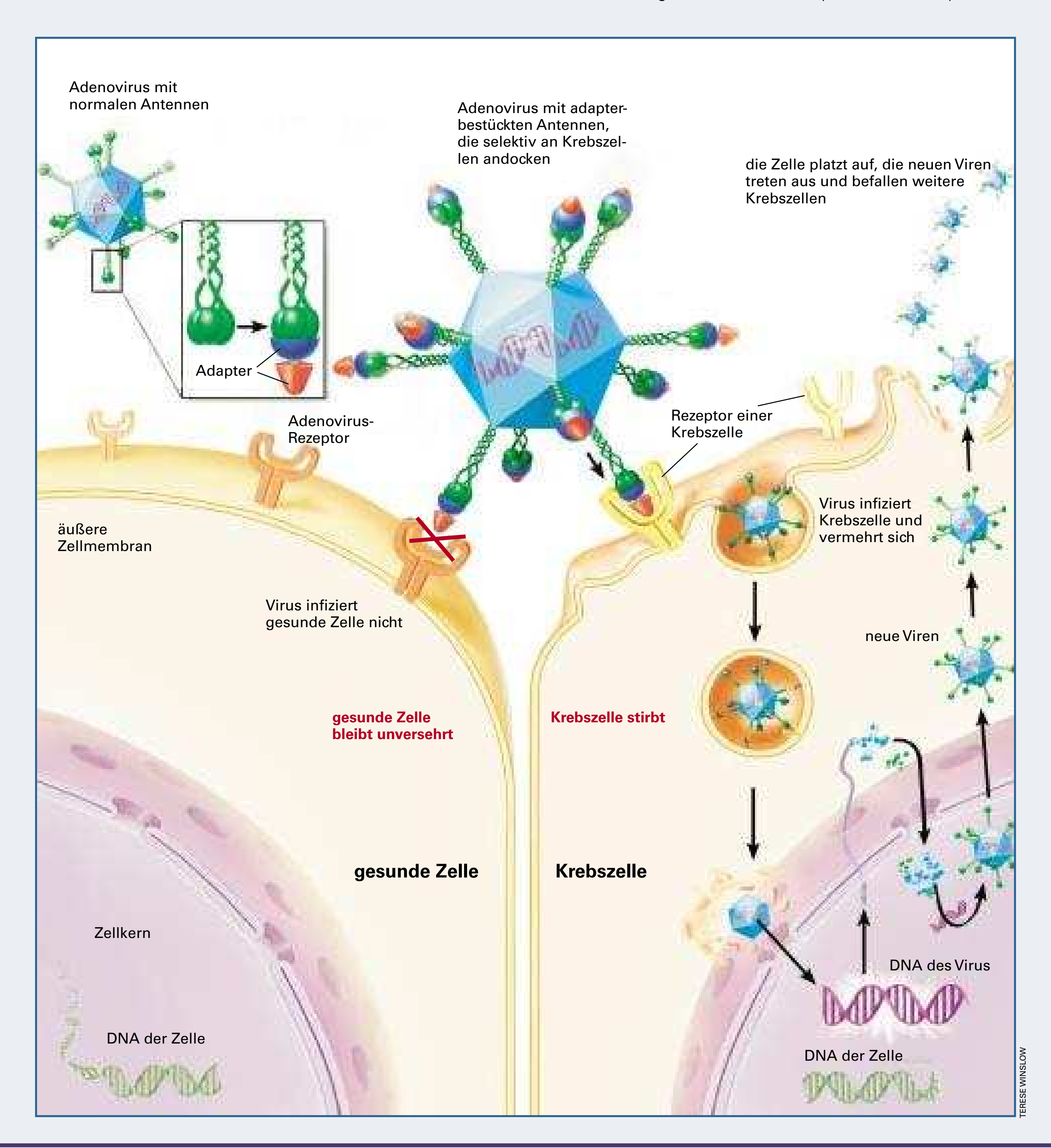
Jede Form einer Virotherapie birgt ihre speziellen Vor- und Nachteile, die es abzuwägen und auszubalancieren gilt, um für den Patienten das bestmögliche Ergebnis zu erreichen. Bei der Konstruktion der kleinen Helfer können die Molekularmediziner inzwischen viele virale Eigenschaften beeinflussen. Ein Problem mit therapeutischen Adenoviren ist noch, dass sie oft Symptome wie bei Erkältungskrankheiten hervorrufen, unter Umständen bis hin zu schweren grippeähnlichen Erscheinungen. Dies ist Ausdruck einer gegen das Virus gerichteten Immunantwort des Patienten. Sie verhindert einerseits ein unkontrolliertes Ausbreiten des Erregers im Körper und

## IN KÜRZE

- Der neue Ansatz der **Virotherapie gegen Krebs** ermöglicht dank neuer molekularer Umbautechniken, Viren gezielt auf Krebszellen anzusetzen – sei es, dass die Viren nur entartete Zellen befallen oder dass sie nur in diesen aktiv werden. Die ersten solchen Krebs zerstörenden – **onkolytischen** – **Viren** werden bereits an Patienten getestet.
- Bei der Virotherapie zerstören die Viren kraft ihrer Vermehrung selbst die infizierten Tumorzellen. Die Onkologen nutzen somit einen **natürlichen Prozess**. Bei der Gentherapie von Krebs hingegen sorgen vermehrungsfähige Viren als Genfähren zum Beispiel dafür, dass nur die Tumorzellen Zytostatika ausgesetzt sind.
- Die **Markierung der Viren** mit radioaktiven Substanzen oder mit fluoreszierenden Molekülen – die sie selbst bilden – erlaubt, deren **Verteilung und Vermehrung im Körper** zu verfolgen. Auf die Weise ließen sich auch winzige neue Tumoren aufspüren und eliminieren.

## Spezieller Adapter nur für Krebszellen

Eine Behandlungsstrategie zielt darauf ab, dass die Adenoviren gesunde Zellen gar nicht erst befallen. Stattdessen sollen sie Krebszellen – die sie normalerweise außer Acht lassen – leicht infizieren können. Die Adenoviren werden so verändert, dass sie Krebszellen möglichst spezifisch erkennen. Zu dem Zweck manipulieren Forscher ihre Antennen, mit denen die Winzlinge an Rezeptorstrukturen auf Zellen andocken. Zum Beispiel werden diesen Antennen eigens konstruierte Adaptermoleküle verpasst.



damit dramatische Nebenwirkungen, wie es bei anderen Viren der Fall wäre. Andererseits begrenzt diese Inaktivierung aber auch den Einsatz der Adenoviren gegen Krebs. Derzeit wird geprüft, ob man die Abwehr mit möglichst gezielten Immunsuppressiva eindämmen könnte. Ein anderer Ansatz ist, die Viren so zu verändern, dass das Immunsystem sie weniger gut erkennt.

Damit die Adenoviren in der Krebstherapie zielgenau treffen, arbeiten die Wissenschaftler insbesondere an zwei Strategien, die Wirkung der Erreger auf Tumorzellen zu richten und somit Kollateralschäden zu verhindern. Um noch sicherer zu gehen, ließen sich beide Vorgehensweisen vielleicht sogar kombinieren.

**Zwei verschiedene zielgenaue Angriffsstrategien auf die Krebszellen**

Bei der einen Strategie werden die Viren so manipuliert, dass sie bevorzugt – im Idealfall ausschließlich – Krebszellen befallen (Schema S. 27). Bei der anderen Methode sorgen die Forscher dafür, dass die Gene der Viren allein in Krebszellen aktiv werden können, also für Virusproteine abgelesen werden (Schema rechts). In infizierten normalen Zellen bleiben die Virusgene dann stumm, das heißt die Viren vermehren sich nicht und töten die Zelle darum nicht. Somit breiten sie sich in gesundem Gewebe nicht aus. Die erste Strategie heißt »gezielte Infektion« oder fachlich »gezielte Transduktion« (englisch *transductional targeting*), die zweite Methode »gezielte Genaktivierung« oder »gezielte Transkription« *(transcriptional targeting)*.

Für die gezielte Infektion muss man die äußeren Erkennungsstrukturen der Viren verändern, ihnen sozusagen einen anderen Schlüssel zuteilen. Von allein infizieren Adenoviren die meisten Krebszellsorten nämlich schlecht. Viel besser docken sie an gesunden Zellen einer Reihe von Gewebetypen an, etwa an Leberzellen. Diesem Problem begegnen die Forscher mit Adaptermolekülen, die sich auf den Enden der Virusarme einklinken. Wichtig ist, dass diese Adapter sich mit ihrer Gegenseite spezifisch an Tumorzellen anlagern, das heißt speziell an Strukturen binden, die nur entartete Zellen tragen.

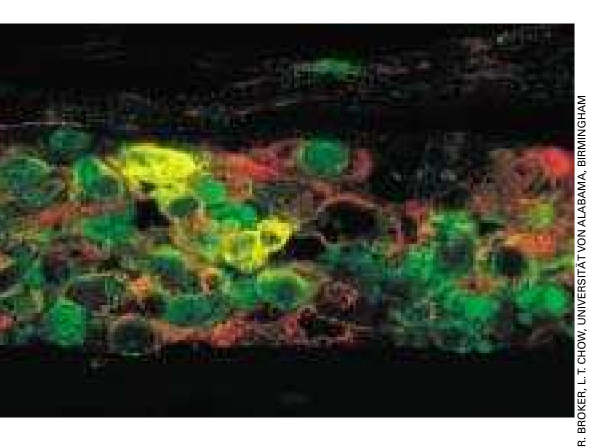
Besonders eignen sich dazu Antikörper: Komponenten des Immunarsenals, die normalerweise dazu da sind, auf eingedrungene fremde Moleküle aufmerksam zu machen. Antikörper sind somit Profis in der genauesten Erkennung und minutiösen Unterscheidung von Strukturen. Für die Virotherapie kann man zwei Antikörper zusammenfügen – einer bindet sich an die Virusantenne, der andere an die Krebszelle – oder auch Antikörper mit anderen Molekülen kombinieren, die sich an Tumorzellen binden.

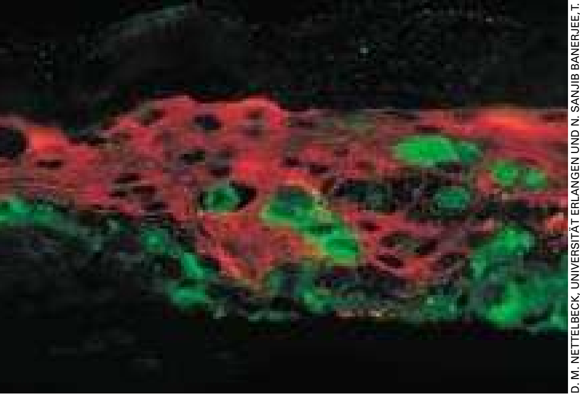
Die Adenoviren entfalten ihre tödliche Wirkung dann wie sonst auch, nur jetzt eben in Tumorzellen. Ein Viruspartikel, das auf der Zelloberfläche angedockt hat, wird von einem Membranbläschen umschlossen und in die Zelle geholt. Dort löst sich das Bläschen auf und das Virus wandert zur Schaltzentrale der Zelle, dem Zellkern, in den es sein Genmaterial injiziert. Kurz darauf stellt die Zelle ihre eigenen Belange zurück und beginnt, die viralen Gene zu vervielfältigen, Virusproteine herzustellen und Tausende neuer Viruspartikel zu bilden. Nach Ablauf der Virusproduktion sind die Reserven der Krebszelle und der Platz in ihr erschöpft. Sie bricht auf und entlässt die neu gebildeten Viren, die dann weitere Krebszellen infizieren können.

Statt den Erkennungsarmen der Viren Kappen zu verpassen, kann man auch diese Antennen selbst für Krebszellen maßschneidern, indem man die entsprechenden Gene der Viren verändert. Auf die Weise hat das Team von einem von uns (Curiel) an der Universität von Alabama in Birmingham Adenoviren hergestellt, die sich an Integrine binden. Mit solchen Molekülen in ihrer Außenmembran befestigen sich Zellen an einem faserigen Netzwerk, der so genannten extrazellulären Matrix, und werden damit zu einem Gewebeverband. Tumorzellen, die ausstreuen, produzieren für ihre Wanderung durch die Gewebe besonders viele Integrinmoleküle, fischen also besonders viele solche Viren auf. Curiels Gruppe behandelte mit den veränderten Adenoviren Mäuse, denen menschliche Eierstockkarzinome übertragen worden waren. Wunschgemäß fanden die Viren die Krebszellen und eliminierten die Wucherungen vollständig.

## Genschalter mit Zielkraft

Für die zweite Strategie, eine gezielte Genaktivierung nur in Krebszellen, verwenden die Forscher in der Regel genetische Schalter, so genannte Promotoren (Schema rechts). Über diese Genschalter wird in den einzelnen Zelltypen – die alle das gleiche Genmaterial enthalten – normalerweise veranlasst, ob und wie oft ein Gen abgelesen wird, also welche Menge des entsprechenden Proteins eine Zelle produzieren darf. So wird bestimmt, welche Laufbahn eine Zelle einschlägt, ob sie beispielsweise zu einer Haut- oder zu einer Leberzelle wird, und wie aktiv sie sein soll, also etwa, welche Signalstoffe und wie viel davon sie zu produzieren hat. Den Oberbefehl dazu erhalten die Promotoren von anderen Instanzen in der Zelle oder auch von außen.



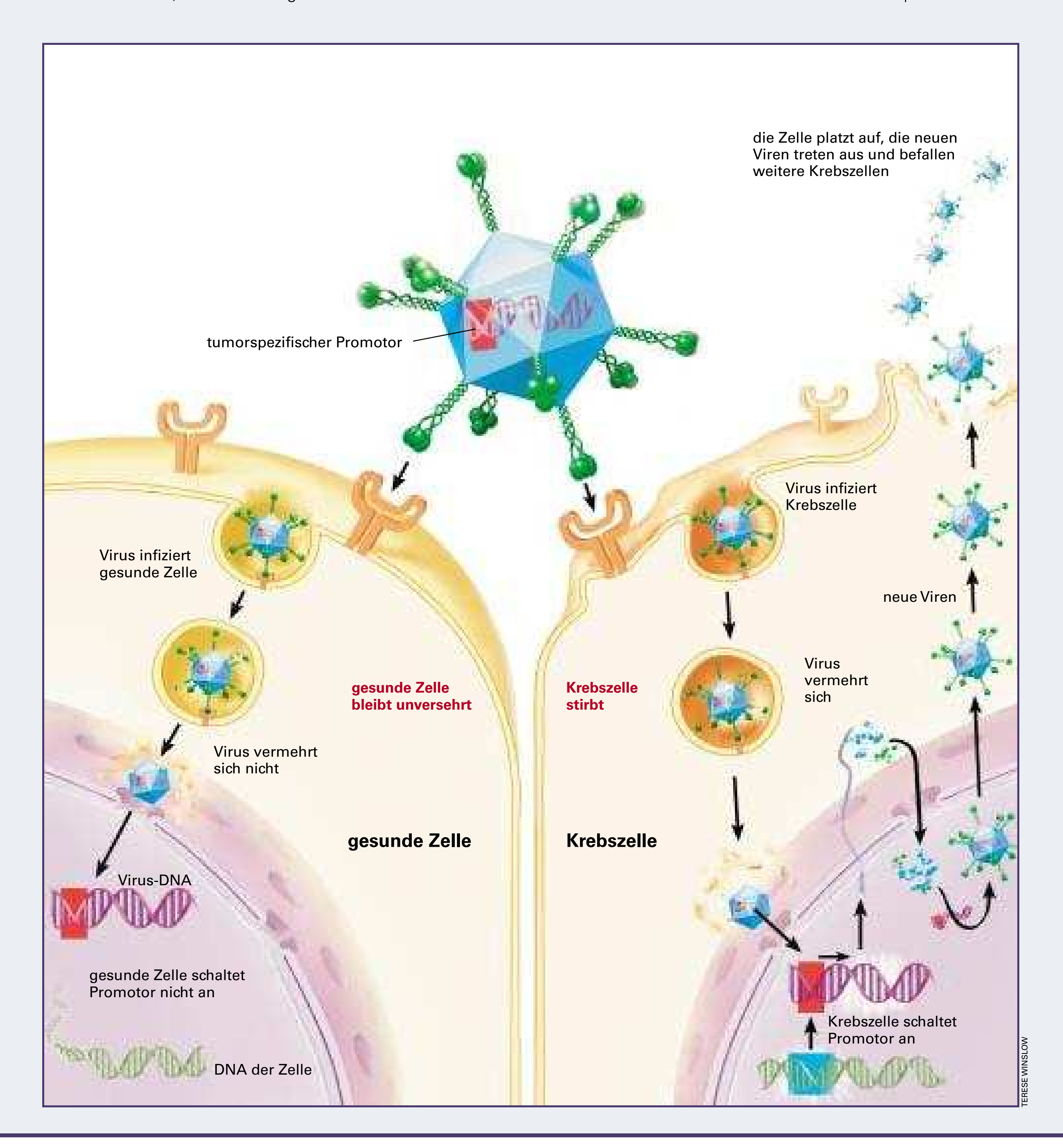


D. M. NETTELBECK, UNIVERSITÄT ERLANGEN UND N. SANJIB BANERJEE, T. R. BROKER, L. T. CHOW, UNIVERSITÄT VON ALABAMA, BIRMINGHAM

**In diesen Zellkulturen aus gesunden Hautzellen (rot markiert) und nicht gefärbten Melanomzellen erscheinen die sich vermehrenden Viren und damit auch infizierte Zellen grün. Im oberen Präparat wurde ein unspezifisches Virus eingesetzt: Gesunde Zellen voller Viren leuchten in der Überlappung gelb. Im unteren Präparat, mit dem im Text beschriebenen promotorgesteuerten Virus versetzt, vermehrte sich das Virus ausschließlich in Melanomzellen.**

## Genschalter, um gesunde Zellen zu verschonen

Bei dieser Strategie sollen die Adenoviren gesunde Zellen nur unversehrt lassen. Sie erhalten zum Beispiel so genannte Promotoren, genetische Abschnitte, welche Gene anschalten. Der Promotor sitzt so, dass die Virusgene ohne ihn nicht aktiv werden können. In gesunden Zellen bleiben die ausgewählten Promotoren stumm: Die virale DNA wird nicht vervielfältigt. Krebszellen werfen die Promotoren an: Nun wird das Virus vermehrt, tötet die entarteten Zellen und sucht sich neue Opfer.



## Einige Firmen, die an der Entwicklung von Virotherapien arbeiten

| Firma | Sitz | Virus | Erkrankung | Modifikation der Viren | Stand der klinischen Studie |
|---|---|---|---|---|---|
| BioVex | Abingdon, Oxfordshire, Großbritannien | Herpes-simplex-Virus | Brustkrebs, Melanom | trägt das Gen für Granulozyten-Makrophagen-koloniestimulierenden Faktor, ein Immunstimulans | Phase I/II |
| Cell Genesys | South San Francisco, Kalifornien, USA | Adenovirus | Prostatakrebs | prostataspezifischer Promotor bedingt Spezifität für Prostatakrebszellen | Phase I/II |
| Crusade Laboratories | Glasgow, Großbritannien | Herpes-simplex-Virus | Gliome (Hirntumoren), HNO-Tumoren, Melanom | fehlendes Gen beschränkt Replikation auf teilungsaktive Zellen | Phase II für Gliome und HNO-Tumoren; Phase I für Melanom |
| Medigene | Martinsried | Herpes-simplex-Virus | Gliome, metastasierte Darmkarzinome | zwei fehlende Gene verhindern die Replikation in normalen Zellen | Phase II für Gliome; Phase I für metastasierte Darmkarzinome |
| Oncolytics Biotech | Calgary, Alberta, Kanada | Reovirus | Prostatakrebs und Gliome | repliziert nur in Krebszellen mit aktivierten *ras*-Onkogenen | Phase II für Prostatakarzinome; Phase I/II für Gliome |
| OVCure | Gaithersburg, Maryland, USA | Newcastle-Disease-Virus | verschiedene solide Tumoren in fortgeschrittenem Zustand | keine | Phase I |
| Wellstat Biologics | Jerusalem, Israel | Newcastle-Disease-Virus | verschiedene Tumoren | keine | Phase I/II |

Phase-I-Studien dienen dazu, die Sicherheit einer Therapie bei einer kleinen Anzahl von Patienten zu untersuchen. In Studien der Phasen II und III werden Dosierung und Wirksamkeit der Therapie untersucht.

▷ Zum Beispiel bilden die Pigmentzellen der Haut, die Melanozyten, sehr viel des schwarzen Farbstoffs Melanin. Die meisten anderen Körperzellen brauchen kein dunkles Pigment als Sonnenschutz und bilden auch keines. In ihnen bleibt deswegen der Promotor abgeschaltet, der die Produktion des Schlüsselenzyms für die Melaninsynthese freigibt. Doch Melanozyten haben diesen Promotor angeschaltet.

Das möchte sich einer von uns (Nettelbeck) beim Melanom, dem bösartigsten – schwarzen – Hautkrebs, zu Nutze machen. In den überaus meisten Melanomzellen, auch in den Metastasen, ist das Gen für die Melaninsynthese voll aktiv. Die Tumoren sind deshalb schwarz. Unsere Arbeitsgruppe, und inzwischen auch weitere Labors, konnten mit Hilfe dieses Mechanismus Adenoviren konstruieren, die sich nur in pigmentierten Zellen, und damit auch in Melanomzellen, vermehren (siehe Bilder S. 28).

Diesen Viren wurde der genannte Promotor eingebaut. Der Trick dabei ist, dass das Schaltelement genau vor Virusgenen liegt, mit denen die Virusvermehrung gestartet wird. So können neue Viren nur in Zellen entstehen und sie töten, die diesen Promotor tatsächlich anwerfen. Andere Körperzellen, in die das Virus auch eindringt, bleiben verschont. In Zellkulturen hat die Vorgehensweise viel versprechende Ergebnisse gebracht. Ob und wie stark durch eine solche Therapie gesunde Pigmentzellen betroffen würden – es entstünden dann pigmentfreie Hautflecken –, muss noch untersucht werden. Solche Nebenwirkungen ließen sich durch den Einbau weiterer Mechanismen verhindern, die zwischen Krebs- und normalen Pigmentzellen unterscheiden (siehe unten).

Zurzeit entwickeln die Forscher onkolytische Adenoviren mit einer ganzen Palette unterschiedlicher Promotoren. Sie richten sich gegen verschiedenste Krebsformen. Zum Beispiel springt bei Leberkrebs ein Promotor für ein beim Embryo und Fetus aktives Gen (das alpha-Fetoprotein) wieder an, der sonst nach der Geburt abgeschaltet bleibt. Adenoviren mit diesem Promotor wären eine zielgenaue und sehr effektive Waffe gegen bösartige Lebertumoren.

An Patienten getestet wurde ein ähnliches Verfahren bereits bei zwanzig Männern mit Prostatakrebs, bei denen der Tumor nach einer Strahlentherapie wieder wuchs. Dabei verwendete die Gruppe um Jonathan W. Simons von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) ein von der Firma Cell Genesis entwickeltes Adenovirus mit dem Promotor für das prostataspezifische Antigen, das solche Tumoren reichlich ausprägen. Die Patienten erhielten das Virus in unterschiedlichen Mengen. Wie die Forscher 2001 bekannt gaben, traten keine ernstlichen Nebenwirkungen auf. Und bei der höchsten Dosierung, getestet bei fünf Männern, schrumpften die Tumoren auf die Hälfte und mehr.

### Kombination der Strategien zwecks besserer Treffsicherheit

Es ist wahrscheinlich, dass die Krebs-Virotherapie noch zielgenauer und nebenwirkungsärmer funktioniert, wenn man die beiden genannten Strategien in einem Virus vereint. So ist anzunehmen, dass bei einer gezielten Virusinfektion von Krebszellen die eigens dafür konstruierten Viren in geringem Maße zugleich normale Zellen infizieren. Genauso würden bei der gezielten Genaktivierung beispielsweise Viren, die den Promotor für das Schlüsselgen der Melaninsynthese

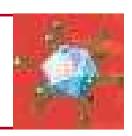
tragen, wie gesagt außer in Melanomen natürlich auch in normalen Pigmentzellen agieren. Es liegt darum nahe, beide Verfahren zu kombinieren. Noch sind wir aber nicht so weit. Ein entscheidender Vorteil der Virotherapie gegenüber einer konventionellen Krebsbehandlung ist jedoch, dass diese Agenzien ein Mosaik von Modifikationen auf verschiedenen Ebenen erlauben – mit dem Ziel einer hochspezifischen Wirkung.

Eine dritte Strategie der gezielten Virotherapie soll an einer charakteristischen Eigenschaft von Krebszellen angreifen: ihrer fortgesetzten unkontrollierten Teilung. Gesunde Zellen nutzen bestimmte Proteine als Wachstumsbremse. In Krebszellen sind in der Regel eines oder mehrere davon ausgefallen. Zu den wichtigsten Hemmstoffen, die bei Krebs nicht mehr funktionieren, gehören zwei als pRb und p53 bezeichnete Proteine. Manche Viren, darunter die Adenoviren, setzen, wenn sie Zellen infizieren, eben diese Hemmproteine mit eigenen Molekülen außer Gefecht. Denn die Zelle muss dazu veranlasst werden, sozusagen ihre eigene Teilung einzuleiten, damit sie die viralen Gene vervielfältigen kann.

Den Mechanismus nutzen Virotherapeuten nun aus. Sie entwickeln Adenoviren, die diese Hemmproteine nicht mehr abzublocken vermögen und sich infolgedessen in gesunden Zellen nicht vermehren können. Weil die Hemmproteine in Krebszellen ohnehin fehlen, steht dort der Virusvermehrung nichts im Wege – und die Tumoren gehen unter den Viren zu Grunde. Dieser Ansatz wurde bereits in zahlreichen klinischen Studien an Tumorpatienten im fortgeschrittenen Stadium untersucht. Die Verträglichkeit der Virotherapie erwies sich als gut, jedoch schrumpften die Tumoren nur in einzelnen Fällen. Allerdings trugen die hierbei verwendeten Viren ihre normale Hülle. Tierversuche, in denen Viren eingesetzt wurden, die zugleich gezielt Krebszellen infizieren, brachten schon deutlich bessere Resultate. Solche doppelt ausgestatteten Virusvarianten sollen demnächst auch an Krebspatienten getestet werden.

Man kann onkolytische Viren auch noch schärfer machen, indem man sie zusätzlich mit therapeutischen Genen ausstattet, welche die Zellen für Zytostatika sensibilisieren. Viro- und Gentherapie würden dann kombiniert. So würden nur die infizierten Zellen und ihre Nachbarn, also nur der Tumor, Zytostatika ausgesetzt. Dem Patienten verabreicht man ungiftige Vorläufermoleküle, die erst in den Krebszellen zu Zellgiften umgebaut werden und sich im Tumor anreichern. Beispielsweise setzten André Lieber und seine Arbeitsgruppe von der Universität von Washington in Seattle in onkolytische Adenoviren Gene ein, deren Proteine eine ungefährliche Substanz in die Chemotherapeutika Camptothecin beziehungsweise 5-Fluorouracil umwandeln. Die Viren vermehrten sich ausschließlich in Tumorzellen, und nur dort entstanden die für die Zytostatika-Aktivierung verantwortlichen Proteine.

## Beobachtung des Therapieprozesses mit markierten Viren



Ein Manko vieler Krebstherapien ist, dass die Ärzte oft während der Behandlung nicht wissen, wie effektiv die Maßnahmen wirken. Bei der Virotherapie wäre die Kontrolle aber besonders wichtig, um den Verlauf der Behandlung zu erkennen, die Dosierung der Erreger auszubalancieren oder gar, um unbekannte Metastasen aufzuspüren. Hier könnten markierte Viren Abhilfe bringen, die sich dann mit bewährten Methoden medizinischer Bildgebung beobachten ließen. In Zusammenarbeit mit Radiologen ersinnen Mediziner verschiedene Verfahren, um genau verfolgen zu können, wo und wie stark sich die Viren im Körper des Patienten vermehren.

Eine Idee ist, den Viren Gene für ein Protein mitzugeben, das entweder selbst als Marker dient oder einen Markierstoff, etwa eine radioaktive Substanz, an sich bindet. Die Forscher experimentieren zum Beispiel mit Genen von Meerestieren für fluoreszierende Proteine. Fluoreszierende Viren würden sich vor allem für Tumoren auf der Haut oder an endoskopisch gut zugänglichen Stellen wie dem Kehlkopf eignen. Für innere Tumoren ließen sich eher die üblichen schwach radioaktiv strahlenden Substanzen einsetzen. Alternativ könnte ein ins Blut abgegebenes Protein als Verlaufsmarker der Therapie dienen. Die Lage des Tumors würde es allerdings nicht anzeigen.

Die Fluoreszensmethode bewährt sich schon mit auf Krebszellen abgerichteten, aber vermehrungsunfähigen Viren. Forscher nutzen das, um sichtbar zu machen, ob die Viren tatsächlich speziell den Tumor befallen und dann wie gewünscht wirken. Wir sind überzeugt, dass die derzeit großen Fortschritte bei den bildgebenden Verfahren auch den klinischen Studien zur Virotherapie zugute kommen. Das verspricht zunehmend effektivere Behandlungen mit onkolytischen Adenoviren.

Vor zehn Jahren sagte der Pionier der Gentherapie W. French Anderson von der Universität von Südkalifornien in Los Angeles voraus, dass um das Jahr 2000 die ersten zielgenauen viralen Genfähren an Menschen getestet würden. An Krebspatienten haben solche Studien tatsächlich begonnen. Vor wenigen Monaten hat China für den klinischen Einsatz das weltweit erste Virusmedikament zugelassen, einen Adenovirusvektor für eine Gentherapie von Krebs. Weitere vor zehn Jahren nicht absehbare Studien mit onkolytischen Viren laufen.

Im Grunde nutzt diese Medizin vor allem Mechanismen der Natur. Schließlich sind Viren im gezielten Töten von Zellen Profis. In der Medizin des 21. Jahrhunderts werden sie, so hoffen wir, einen besonderen Rang einnehmen – als Therapeuten. ◁

**AUTOREN UND LITERATURHINWEISE**



**Dirk M. Nettelbeck** (oben) und **David T. Curiel** begannen ihre Zusammenarbeit am Gentherapiezentrum der Universität von Alabama in Birmingham. Nettelbeck forschte dort nach seiner Promotion mehrere Jahre als Molekularbiologe. Er leitet heute an der Universität Erlangen in der Dermatologischen Klinik eine Forschungsgruppe für Virotherapie des malignen Melanoms. Curiel hat Professuren an der Freien Universität Amsterdam und an der Universität von Alabama, wo er die Abteilung für Humangentherapie leitet.

Virotherapeutics: conditionally replicative adenoviruses for viral oncolysis. Von Dirk M. Nettelbeck in: Anticancer Drugs, Bd. 14, Heft 8, 9/2003, S. 577

Vector targeting for therapeutic gene delivery. Von D. T. Curiel und J. T. Douglas (Hg.). John Wiley & Sons, 2002

Cytolytic viruses as potential anti-cancer agents. Von C. J. A. Ring in: Journal of General Virology, Bd. 83, S. 491, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

# Klimawandel auf der Erde – die planetare Krankheit

Derzeit sorgt Roland Emmerichs »The day after tomorrow« für Furore. Der wissenschaftliche Hintergrund dieses Horrorszenarios ist durchaus seriös. Denn dass sich unser Klima dramatisch wandelt, lässt sich nicht mehr bestreiten.

Von Harald Kohl und Helmut Kühr

Heiß, feucht und stickig ist es auf der Venus, frostig kalt und rostrot kennt man den Mars, und brüllend wüstenheiß stellt man sich die Oberfläche des Merkur vor. Die Erde hingegen gilt als blaues Paradies – wie geschaffen für Fauna, Flora und Ökosysteme, und nicht zuletzt für den Menschen. Viele plastische Beschreibungen der »Welten« auf unseren planetaren Nachbarn und dem Blauen Planeten haben manches Klischee in den Köpfen hinterlassen. Eines suggerieren diese Vorstellungen dabei besonders: Die klimatischen Bedingungen auf den Planeten sind offenbar unveränderlich.

Doch das Gegenteil kann der Fall sein. Wir haben das wichtigste Beispiel sogar unmittelbar vor Augen: Das Klimasystem der Erde ist keineswegs so konstant, wie die menschliche Erfahrung dies nahe legt. Das Klima wandelt sich, ist äußerst dynamisch und möglicherweise fragil. Die umfassendste Untersuchung hierzu hat der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimafragen *(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)* erstellt. In der aktuellen Version, dem 2001 vorgelegten Third Assessment Report, ist nicht nur skizziert, wie sich das Klima in den nächsten Jahrzehnten voraussichtlich weiter ändern wird und welche Folgen dies haben kann; der Bericht macht auch unmissverständlich klar, dass der Mensch die wichtigste Ursache für diesen globalen Wandel ist. Von der vierten Ausgabe des Berichts, die gegenwärtig vorbereitet wird und 2007 erscheinen soll, ist sicherlich keine Entwarnung zu erwarten.

## Die Fieberkurve steigt

Fast könnte man von einer Krankheit sprechen, an der unser Heimatplanet leidet, und tatsächlich hat dieser beliebte Vergleich einiges für sich. Die Diagnose zeigt immer deutlicher vielfältige Symptome auf, die fast syndromhaft verknüpft sind.

Erstes Symptom der Klimakrankheit: Die globale mittlere Temperatur der Atmosphäre steigt (Grafik S. 35). Wenngleich das Erdklima über geologische Zeiträume hinweg stets deutlichen Schwankungen unterworfen war, blieb es in den letzten tausend Jahren bemerkenswert stabil. Abgesehen von zwei kühleren Perioden im 14. und im 16. Jahrhundert – bekannt als »Kleine Eiszeit«, die Wetter- und Lebensverhältnisse in Mittel- und Nordeuropa immerhin signifikant veränderte – variierte der Mittelwert der globalen Lufttemperatur um kaum mehr als ein bis zwei Zehntel Grad. Doch seit rund 150 Jahren weist die Fieberkurve deutlich nach oben. Zwischen 1860 und 2000 stieg der Wert um 0,6 Grad Celsius. Dieser Zeitraum fällt mit der expandierenden Industrialisierung des 19. Jahrhunderts, mit dem Beginn des »fossilen Zeitalters« zusammen – und das nicht zufällig, wie noch zu zeigen sein wird.

Wie lassen sich globale Temperaturen vergangener Jahrhunderte und Jahrtausende rekonstruieren? Den Wissenschaftlern steht dafür eine breite Palette an Handwerkszeugen zur Verfügung. Am wichtigsten sind selbstverständlich direkte, systematische Temperaturmessungen – doch die gibt es erst seit 100 bis 150 Jahren. Für weiter zurückliegende Zeiten liegen hingegen nur »Proxy«-Daten vor, die auf der Untersuchung von Baumringen, Korallenwachstum,

CINETEXT

**Eiszeit in Manhattan – bisher nur im Film. Doch Wissenschaftler warnen seit langem vor den Folgen eines dramatischen Klimawandels.**

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

Eisbohrkernen und historischen Berichten beruhen. Zwar sind solche indirekten Daten mit höheren Unsicherheiten behaftet, die umso größer werden, je weiter man in vergangene Zeiten vordringt. Dennoch: Es ist deutlich und auch von den stärksten Zweiflern nicht abzustreiten, dass es ein signifikantes Signal gibt, das sich aus diesem Rauschen erhebt – die Erde erwärmt sich.

Zweites Symptom: Die globalen Niederschläge haben zugenommen – im Mittel um 5 bis 10 Prozent seit Beginn des 20. Jahrhunderts. Dabei gibt es erhebliche geografische Unterschiede im Niederschlagsmuster: In manchen Regionen Afrikas, etwa der Sahelzone, ist die Regenmenge um rund die Hälfte gesunken, in Teilen Australiens, Nordamerikas und Nordeuropas um bis zu 30 Prozent gestiegen (s. Grafik S. 36). Der Grund hierfür ist offensichtlich: Der Wasserkreislauf wird durch erhöhte globale Temperaturen angeheizt, die Erde kommt quasi ins Schwitzen. Eine Folge davon ist auch die erhöhte Anzahl von Starkniederschlägen. Allein in mittleren und höheren Breiten der Nordhalbkugel, so schätzt IPCC, ist die Zahl solcher wolkenbruchartiger Regenfälle in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts um zwei bis vier Prozent gestiegen.

In engem Zusammenhang hiermit steht das dritte Symptom der Erderwärmung: die Zunahme extremer Wettersituationen. Starkniederschläge, Stürme, aber auch Trockenheiten und lang anhaltende Dürren traten im letzten Jahrhundert in einigen Weltregionen gehäuft auf. Während solche Ereignisse wegen ihrer unmittelbaren, teils katastrophalen Auswirkungen die Schlagzeilen prägen, setzt sich eine eher schleichend verlaufende Entwicklung weniger stark im öffentlichen Bewusstsein fest: Die erreichten Tages- sowie die minimalen Nachttemperaturen übersteigen immer wieder die bisherigen Rekordwerte. Die 1990er Jahre waren das wärmste Jahrzehnt. Der ▷

## Kioto-Protokoll

**Das Kioto-Protokoll wurde 1997** von der 3. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention angenommen. In dem Protokoll verpflichten sich die Industriestaaten, ihre gemeinsamen Emissionen der wichtigsten Treibhausgase im Zeitraum von 2008 bis 2012 um mindestens 5 Prozent unter das Niveau von 1990 zu senken. Dabei haben die Länder unterschiedliche Emissionsreduktionsverpflichtungen akzeptiert. Die konkrete Ausgestaltung des Protokolls wurde auf der Fortsetzung der 6. Vertragsstaatenkonferenz in Bonn sowie der 7. Vertragsstaatenkonferenz in Marrakesch fertig gestellt. Damit das Protokoll in Kraft treten kann, muss es von mindestens 55 Staaten ratifiziert werden, wobei diese mindestens 55 Prozent der $CO_2$-Emissionen der so genannten Annex-I-Länder (Industrieländer und Länder des ehemaligen Ostblocks) von 1990 auf sich vereinigen müssen.

**Bis heute haben mehr als 120 Staaten ratifiziert,** darunter auch die Länder der Europäischen Union. Zum In-Kraft-Treten des Protokolls fehlt derzeit lediglich die Ratifikation Russlands als einem der größten Treibhausgas-Emittenten vor 1990.

## Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

**Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimafragen** *(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)* wurde 1988 vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen und der Weltorganisation für Meteorologie ins Leben gerufen. Zu seinen Aufgaben gehört es,

- den aktuellen Wissensstand zu den unterschiedlichen Aspekten der Klimaproblematik darzustellen,
- die Folgen von Klimaänderungen für Umwelt und Gesellschaft abzuschätzen,
- realistische Vermeidungs- oder Anpassungsstrategien zu formulieren, sowie
- die Teilnahme von Entwicklungs- und Schwellenländern an den IPCC-Aktivitäten zu fördern.

**Der IPCC hat wissenschaftlich wie politisch** einen außergewöhnlichen Charakter. Er versammelt viele hundert Wissenschaftler aus aller Welt, die das gesamte Wissen um das Weltklima zusammentragen und in regelmäßigen Abständen bewerten. Dabei entstehen ungefähr alle fünf Jahre die so genannten Sachstandsberichte in Form umfassender Kompendien, die auf Grund eines umfangreichen und transparenten Gutachtersystems von Wissenschaft und politischen Entscheidungsträgern gleichermaßen akzeptiert werden. Zudem bemüht sich der IPCC, Methoden zur umfassenden Überwachung des Klimas zu entwickeln. Besondere Fragestellungen werden in unregelmäßiger Folge in Spezialberichten bearbeitet.

**Der IPCC gliedert sich in drei Arbeitsgruppen.** Arbeitsgruppe I beschäftigt sich mit den naturwissenschaftlichen Aspekten des Klimasystems, Arbeitsgruppe II bewertet die Folgen des Klimawandels sowie geeignete Anpassungsstrategien und Arbeitsgruppe III konzentriert sich auf mögliche Strategien, die dadurch entstehenden Probleme zu mildern.

▷ Bericht nennt 1998 das wärmste Jahr des 20. Jahrhunderts. Doch in Deutschland erwies sich das Jahr 2000 als noch wärmer: Der Mittelwert der Temperatur erreichte dem Deutschen Wetterdienst zufolge 9,9 Grad Celsius, das sind 1,6 Grad mehr als der Mittelwert für das vergangene Jahrhundert.

Auf Grund dieser Erwärmung nimmt die Anzahl der Frosttage beständig ab, und der tägliche Temperaturgang hat sich über den meisten kontinentalen Landregionen verändert. Konsequenzen hat dies unmittelbar für Flora und Fauna (siehe »Wenn der Frühling zu früh kommt«, Spektrum der Wissenschaft, 4/2004, S. 56). Doch auch unsere Gesellschaft ist direkt betroffen: Die volkswirtschaftlichen Verluste, die weltweit durch Extremereignisse verursacht werden, haben sich zwischen den 1950er und den 1990er Jahren inflationsbereinigt etwa verzehnfacht (s. Grafik S. 39).

### Mehr Wasser, weniger Eis

Viertes Symptom: der Anstieg des Meeresspiegels. Durch die höheren Umgebungstemperaturen dehnt sich das Wasser in den Ozeanen aus. Diese thermische Expansion ist für den größten Teil des Meeresspiegelanstiegs von 10 bis 20 Zentimetern im letzten Jahrhundert verantwortlich. Die Erwärmung des Meerwassers ist auch die Ursache dafür, dass die Dicke des arktischen Eisschilds seit den 1950er Jahren um 10 bis 15 Prozent zurückgegangen ist.

Weitere Symptome sind ebenfalls unübersehbar. Die Schneebedeckung der nördlichen Erdhalbkugel ist seit den späten 1960er Jahren um rund 10 Prozent gesunken. Verbunden mit dem dadurch geringeren Rückstrahlvermögen der Erdoberfläche, der so genannten Albedo, kommt es zu einer positiven Rückkopplung und weiterer Erwärmung. Auch außerhalb der arktischen und antarktischen Regionen schmelzen Berggletscher ab. Kontinentale Seen und Fließgewässer sind heute rund zwei Wochen länger eisfrei als zu Beginn des letzten Jahrhunderts.

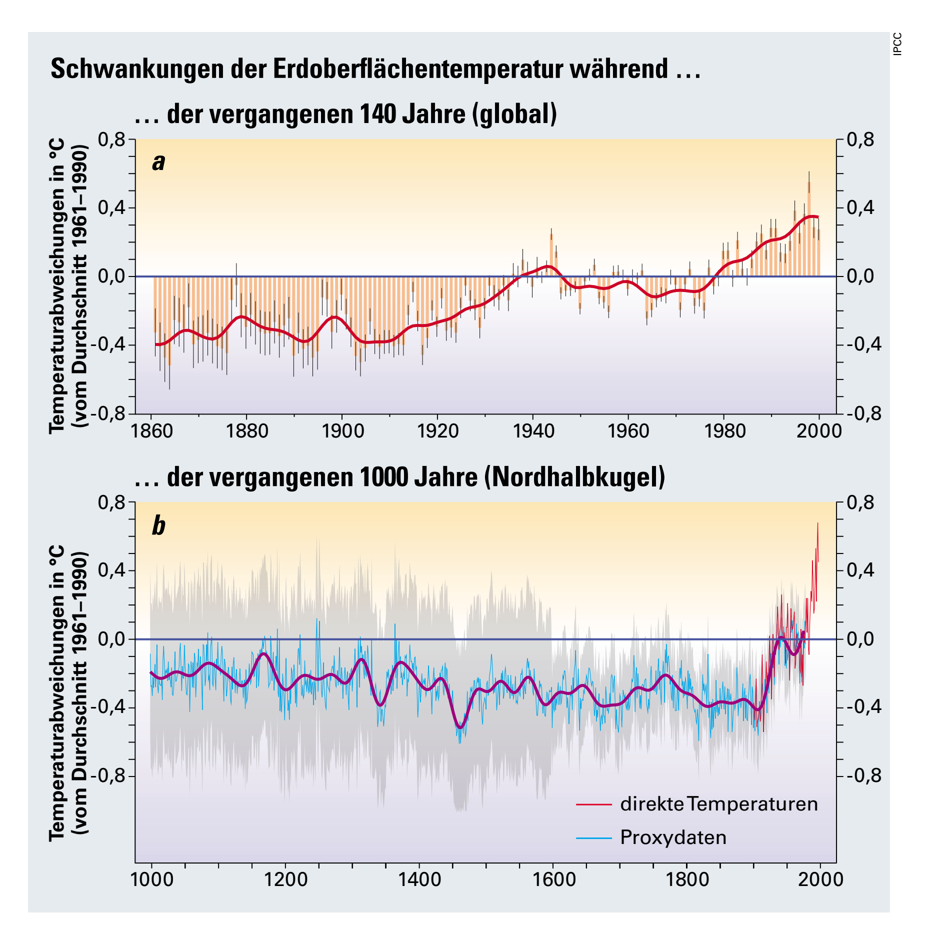
Was sind nun die Ursachen für die Beschwerden des Patienten Erde? Die Temperatur der Erdatmosphäre wird vor allem durch den globalen Treibhauseffekt bestimmt: Die Lufthülle lässt Sonnenlicht ungehindert passieren, absorbiert jedoch die von der Erdoberfläche emittierte Wärmestrahlung, sodass thermische Energie in der Atmosphäre gebunden wird. Ohne diese »Wärmedämmung« wäre es auf der Erde viel zu kalt und Leben damit nicht möglich. Zusätzlich zu



**Der Rückgang des Morteratschgletschers in den Schweizer Alpen demonstriert augenfällig die Abnahme der Inlandvereisung.**

den natürlich vorhandenen Substanzen wie etwa Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan und Distickstoffoxid gibt es aber noch eine Reihe menschengemachter – anthropogener – Treibhausgase unterschiedlicher Wirksamkeit. Bekanntestes Beispiel sind die synthetischen, fluorhaltigen Gase, zu denen die ozonschichtschädigenden Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) ebenso gehören wie einige ihrer industriellen Ersatzstoffe. Kühlend auf die Erdatmosphäre wirken hingegen manche Schwebstoffe. Von besonderem Interesse sind hierbei Sulfataerosole, die sich aus Schwefeldioxid bilden können, in der Atmosphäre aber nur eine begrenzte Verweildauer haben.

Die Konzentrationen all dieser wichtigen Komponenten sind in den vergangenen 200 Jahren gestiegen: Distickstoffoxid um rund ein Fünftel, Kohlendioxid um rund ein Viertel, Methan gar auf das Doppelte. Lediglich bei den kühlenden Aerosolen ist nach langen Jahrzehnten des Anstiegs in den vergangenen ein bis zwei Jahrzehnten ein Rückgang zu beobachten, wahrscheinlich als Folge der Entschwefelungsmaßnahmen in den Industrieländern und des Zusammenbruchs der Wirtschaftssysteme in Osteuropa.




Die mittlere Oberflächentemperatur der Erde stieg seit 1860 um etwa 0,6 Grad Celsius an (a). Eine solch starke Erhöhung ist für das letzte Jahrtausend ohne Beispiel (b). Die Unsicherheiten der direkt und indirekt gemessenen Temperaturen sind als rote Balken und schwarze Striche (a) beziehungsweise als blaue Linie und graues Band (b) dargestellt. Wegen unzureichender Daten ist der historische Temperaturverlauf für die Südhalbkugel nicht analysierbar.

## Wissenschaftliche Grundlagen für politische Entscheidungen

Die zu beobachtende globale Erwärmung ist demnach eine komplexe Mischung aus vielen Faktoren, natürlichen ebenso wie anthropogenen. In der politischen Diskussion wird leider allzu häufig unzulässig vereinfacht oder je nach Interessenlage sogar bewusst verfälscht. Natürliche Einflüsse, insbesondere die solare Einstrahlung und temporäre Änderungen der atmosphärischen Zusammensetzung (zum Beispiel durch Vulkanausbrüche), sind eine Seite der Medaille. Solche Vorgänge haben tatsächlich über Jahrmilliarden hinweg zu beträchtlichen Klimaschwankungen geführt. Doch vollständig und plausibel erklären lässt sich der derzeitige, selbst für paläoklimatologische Verhältnisse drastische Klimawandel nur durch den Einfluss anthropogener Aktivitäten: intensive Landwirtschaft, Emissionen von Industriegasen und, am allerwichtigsten, Verbrennung fossiler Brennstoffe für Transport und Energieerzeugung.

Vorhersagen sind schwierig, nicht zuletzt wegen der komplexen Hydrodynamik einer planetaren Gashülle. Doch bei der Klimaprognose geht es zunächst einmal nur um Trends, um deren Stärken und, wenn möglich, auch deren regionale Variationen. Für die politischen Entscheidungsträger jedenfalls ist ein solider und zuverlässiger Blick in die Zukunft eine wichtige Grundlage. Die Wissenschaft bedient sich hierfür eines inzwischen weit entwickelten Instruments: der Klimamodellierung.

Freilich hängt das Ergebnis von Rechnungen immer davon ab, welche Ausgangsdaten in die Klimamodelle eingespeist werden. Inzwischen sind die Methoden so weit ausgereift, dass klare und belastbare Aussagen über die künftige Entwicklung gemacht werden können. So haben auch die IPCC-Wissenschaftler das gesamte Spektrum möglicher künftiger Verläufe ausgelotet und den aktuellen Wissensstand in einem Spezialbericht (Special Report on Emission Scenarios) zusammengefasst.

Die IPCC-Autoren teilen die mehreren hundert Modellläufe, die in den letzten Jahren konstruiert wurden, in vier große Gruppen:

▶ Modelle, die eine rasante ökonomische Entwicklung im 21. Jahrhundert zu Grunde legen, eine Weltbevölkerung, die um 2050 ihren Höchststand erreichen dürfte, und einen massiven Einsatz neuer und effizienter Technologien. Je nach Dominanz des Einsatzes fossiler oder nichtfossiler Techniken ergeben sich unterschiedliche Implikationen (Modelle A1);

▶ Modelle, die von einer sich sehr heterogen entwickelnden Welt ausgehen. Bei weiterem Bevölkerungsanstieg würde die wirtschaftliche Entwicklung regional sehr unterschiedlich verlaufen, sodass rasante Wachstumsregionen wie Südostasien und stagnierende Regionen wie Afrika nebeneinander stehen könnten (Modelle A2);

**Eisbohrkerne liefern Informationen über die Klimageschichte der Erde – und somit eine wichtige Datenbasis für Prognosen in die Zukunft.**

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

▶ Modelle, die – ähnlich wie A1 – eine rasch wachsende Weltwirtschaft und ein begrenztes Bevölkerungswachstum bis zur Mitte des Jahrhunderts annehmen, die aber zugleich einen rapiden Strukturwandel hin zu einer Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft bei verringerter Material- und Energieintensität voraussetzen (Modelle B1), und

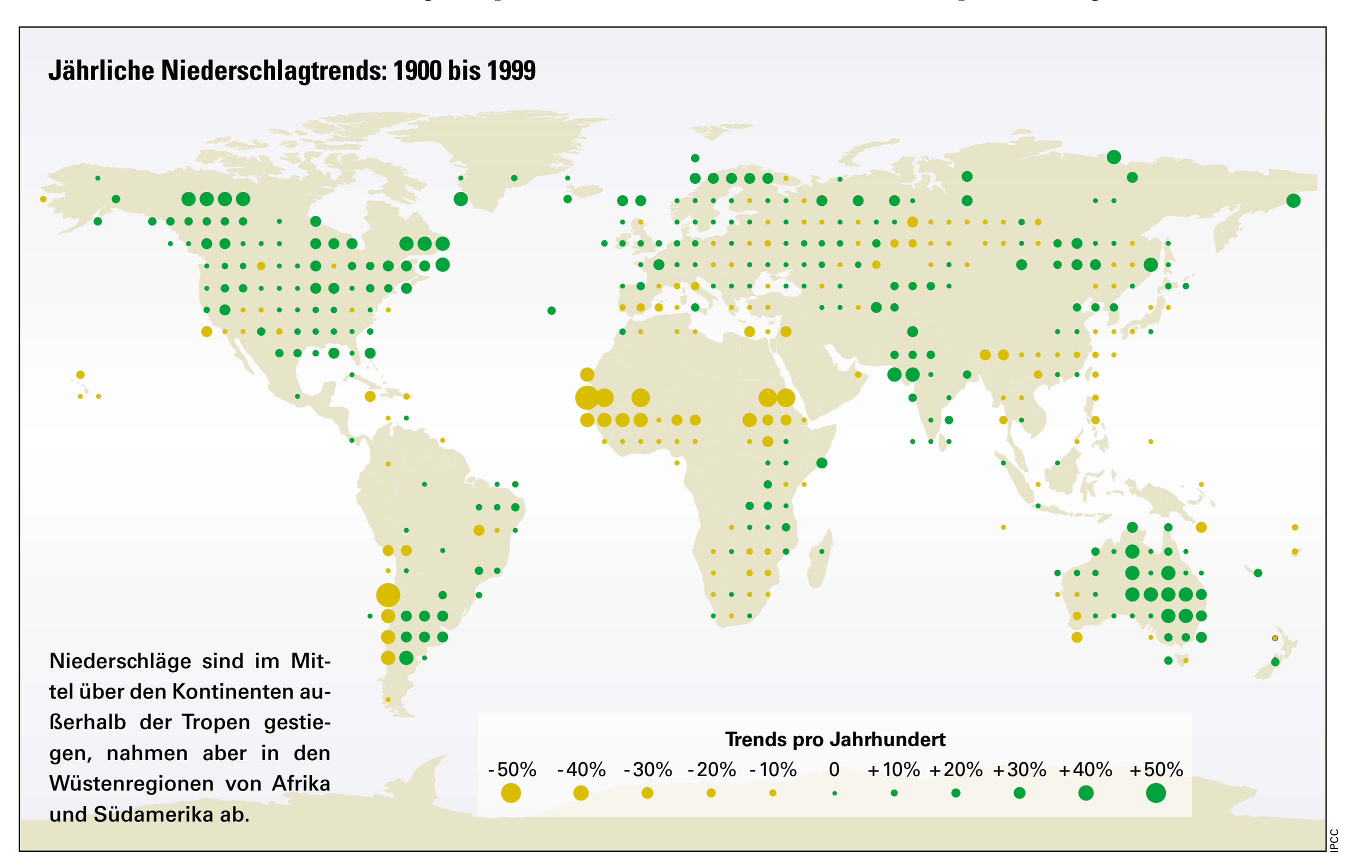
▶ Modelle, die eine Welt beschreiben, die auf Dezentralisierung und lokale Lösungen setzt und allgemein ökonomische und soziale Nachhaltigkeit anstrebt. Moderates Bevölkerungswachstum, maßvoller technologischer Wandel und geringes, aber stetiges Wirtschaftswachstum sind die Kennzeichen dieser Modelle B2.

Trotz der teilweise erheblichen Unterschiede zwischen den Modellen wird deutlich, was wir bis zum Jahr 2100 vom Klima zu erwarten haben. Der Strahlungsantrieb wird weiter steigen und damit auch die globale Fieberkurve um Werte zwischen 1,4 und 5,8 Grad Celsius. Hinzu kommt eine weitere Erhöhung des mittleren globalen Niederschlags um 5 bis 20 Prozent (vor allem in tropischen und hohen geografischen Breiten bei gleichzeitiger Abnahme in bereits jetzt semi-ariden Gebieten), ein weiterer massiver Rückgang der Gletscher sowie ein Meeresspiegel-Anstieg zwischen 10 und 90 Zentimetern.

Wichtigste Feststellung des IPCC ist: Die Krankheit Klimawandel wird fortschreiten und nützliche wie schädliche Wirkungen auf ökologische und sozioökonomische Systeme haben – doch je stärker und je rascher sich das Klima ändert, desto mehr werden die schädlichen Effekte dominieren.

Es gibt freilich Dinge zwischen Stratosphäre und Erdoberfläche, die sich nicht so leicht prognostizieren lassen. »Komplikationen« würde man medizinisch dazu sagen – Phänomene, die unvermittelt und zusätzlich eintreten und dem Verlauf einer Krankheit dramatische Wendungen geben könnten. Im Klimasystem der Erde sind dies nichtlineare geophysikalische Phänomene, die das herrschende Gleichgewicht in Teilen der Welt oder global überraschend aus den Fugen geraten lassen können.

Bekanntestes Beispiel hierfür ist ein abruptes Versiegen der thermohalinen Strömung im Nordatlantik, die sich unter anderem im Golfstrom manifestiert. Diese Strömung wirkt im globalen ozeanischen Zirkulationssystem als kräftige Pumpe, die Energie aus der Karibik in ▷




Niederschläge sind im Mittel über den Kontinenten außerhalb der Tropen gestiegen, nahmen aber in den Wüstenregionen von Afrika und Südamerika ab.

# Klimawandel à la Hollywood



Wie geht das Kinospektakel »The day after tomorrow« mit dem wissenschaftlichen Hintergrund um? Hierzu äußert sich **Professor Jochem Marotzke**, Geschäftsführender Direktor des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg.

**Spektrum der Wissenschaft:** In Emmerichs Film reißt der Wärmetransport durch den Golfstrom abrupt ab. Ist ein Versiegen dieser Strömung aus wissenschaftlicher Sicht denkbar?
**Jochem Marotzke:** Wenn Sie fragen, ob der Golfstrom plötzlich abreißen könnte, so ist die Antwort ein klares »Nein«. Denn solange es den Kontinent Amerika gibt, die Erde sich dreht und Winde wehen, wird es vor der amerikanischen Küste den Golfstrom als Strömung nach Norden und Osten geben.
**Spektrum:** Also ist die Grundannahme des Films verkehrt?
**Marotzke:** Eine abrupte Klimaänderung ist durchaus möglich. Nur wäre ein Versiegen des Golfsstroms die falsche Charakterisierung. Europa wird nicht deswegen geheizt, weil es den Golfstrom an sich gibt, sondern weil mit ihm etwas Bestimmtes passiert, sobald er die Küste verlassen hat. Im Atlantik gibt das Golfstromwasser Wärme an die Atmosphäre ab, wodurch es sich abkühlt und in die Tiefe sinkt. Dieses Zusammenspiel von Oberflächen- und Tiefenströmung ergibt die Warmwasserheizung. Man müsste also mit einem Abreißen der Tiefenzirkulation in höheren Breiten des Atlantiks argumentieren.
**Spektrum:** Und das könnte passieren?
**Marotzke:** Ja. Es ist eine Welt vorstellbar, in der das Golfstromwasser nicht mehr so weit nach Norden strömt, nicht mehr absinkt und Europa nicht mehr so stark heizt. Den Golfstrom wird es dann noch geben, aber die Rückströmung wird anders verlaufen.
**Spektrum:** Eine Streitfrage ist ja immer, ob das auf natürliche oder menschliche Ursachen zurückzuführen wäre …
**Marotzke:** Wir sind ziemlich sicher, dass so etwas in der Erdgeschichte bereits passiert ist. Fakt ist aber auch: Die Klimaerwärmung durch den anthropogenen Ausstoß von Kohlendioxid könnte ebenfalls die Tiefenzirkulation abreißen lassen. Denn ein wärmeres Klima würde wohl den Wasserkreislauf der Erde verstärken: In hohen Breiten käme es zu mehr Niederschlägen, das Meereis und auch die Gletscher auf Grönland würden abschmelzen. Wir wissen zwar nicht, welcher dieser Effekte dominieren würde, aber alle gingen in die gleiche Richtung: Größere Mengen Süßwasser würden in die Oberfläche des Nordatlantiks eingebracht werden.
**Spektrum:** Wie wirkt sich das auf die Tiefenzirkulation aus?
**Marotzke:** Der Eintrag von Süßwasser reduziert den Salzgehalt des Meerwassers an der Oberfläche. Wenn es nicht mehr so salzreich ist, kann es nicht mehr so leicht absinken. Dadurch könnte die Tiefenzirkulation unterbrochen oder zumindest abgeschwächt werden.
**Spektrum:** Und was wären die Folgen?
**Marotzke:** Die Folgen würden davon abhängen, wie schnell es zu einem Abriss der Tiefenzirkulation käme. Wir können uns zwei grundlegende Szenarien vorstellen: Passierte so etwas in vielleicht 20 Jahren, dann hätten wir bis dahin infolge des zunehmenden Treibhauseffektes ein nur etwas wärmeres Klima als heute, aber dann würde innerhalb weniger Jahre die Temperatur um den Nordostatlantik herum um drei bis fünf Grad sinken – eine plötzliche Abkühlung, eine Klimakatastrophe, wäre also die Folge. Das andere Szenario: Die globale Erwärmung geht über einen Zeitraum von vielleicht hundert Jahren immer weiter und weiter, bis zu einer eher allmählichen Abschwächung der Tiefenzirkulation. Dann hätten wir eine graduelle Abkühlung, die vor dem Hintergrund der globalen Erwärmung gewichtet werden muss.
**Spektrum:** Das sind zwei äußerst unterschiedliche Szenarien. Können Sie die gegeneinander abwägen?
**Marotzke:** Die Anpassung an einen abrupten Klimawandel stellt die Gesellschaft natürlich vor weit höhere Herausforderungen als ein eher schleichend verlaufender. Welches Szenario eintreffen wird, dazu kann die Wissenschaft derzeit keine zuverlässigen Angaben machen. Da besteht noch Forschungsbedarf. Aber die Politik darf selbst ein geringes Risiko für einen abrupten Klimawandel nicht ignorieren, weil die Folgen so immens wären – Emmerichs Film führt uns das ja drastisch vor Augen, auch wenn einiges übertrieben dargestellt wird.

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

**Spektrum:** Ein Temperatursturz im Atlantikwasser um 13 Grad quasi über Nacht ist nicht möglich?
**Marotzke:** Das ist absolut unmöglich. Auch dass Stürme riesige Flutwellen hervorrufen, gehört ins Reich der Hollywood-Märchen. Die Folgen können nicht innerhalb weniger Tage solche Ausmaße annehmen – weder eine solch drastische Abkühlung noch eine derartige Häufung von Naturkatastrophen. Nichts von diesen filmischen Darstellungen ist begründet.
**Spektrum:** Immerhin vermag der Film die Öffentlichkeit für das Thema Klimawandel zu sensibilisieren. Können Sie die teilweise unwissenschaftlichen Inhalte akzeptieren?
**Marotzke:** Sobald ich weiß, die ursprüngliche Prämisse hat etwas Wahres, dann gestehe ich Spielfilmen eine gewisse Übertreibung zu – sie wollen ja in erster Linie unterhalten. Wenn dabei auch eine politische Botschaft rüberkommt, ist das begrüßenswert. Wenn allerdings jemand mit dem Anspruch eines Dokumentarstücks mit solch schiefen Inhalten argumentieren würde, wäre das mehr als kontraproduktiv.

Das Gespräch führte Uwe Reichert, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

## Kein globales Experiment!

**Das Verständnis wissenschaftlicher Zusammenhänge** lebt von Bildern, Vergleichen, Metaphern. Ob es aufeinander prallende Billardkugeln sind, Potenzialwälle, die durchtunnelt werden, oder Superstrings als Gummibänder – komplexe Prozesse und Strukturen werden am besten verstanden, wenn sie sich auf die alltägliche Vorstellungswelt abbilden lassen. Besonders wichtig ist dies bei populären Darstellungen.

Doch Bilder bergen auch Gefahren. Metaphern können schief und unvollständig sein, sie können überzogen werden, zu falschen Schlüssen führen und unzulässig vereinfachen. Globaler Klimawandel ist ein Beispiel dafür. Besonders prominent ist das Bild des »globalen Experiments«. Gewiss ist anthropogener Klimawandel ein Phänomen, bei dem menschliches Handeln unmittelbaren Einfluss auf globale Verhältnisse hat. Doch zum Experiment, jedenfalls zum naturwissenschaftlichen, fehlen ihm zwei entscheidende Merkmale: die kontrollierten Randbedingungen und die Reproduzierbarkeit (mangels Reversibilität). Der Vergleich wird damit doppelt gefährlich. Er trägt nicht nur inhaltlich nicht, er verharmlost (beabsichtigt?) das Problem. Denn wenn Experimente schief gegangen sind, kehrt man schlimmstenfalls die Scherben zusammen und macht ein neues. Mit dem Klimasystem der Erde geht das nicht.

**Vorsicht daher mit Vergleichen.** Das gilt übrigens auch für die »Klimakrankheit« des Planeten Erde. Wenn auch das Bild ein Verständnis erleichtern mag – die Realität ist im Zweifel viel komplexer als die Vorstellung.

▷ den Nordatlantik und damit an die europäischen Nord- und Westküsten schaufelt. Um rund 10 Grad Celsius erhöht dies die mittlere Temperatur in Europa, und ein Nachlassen oder gar Versiegen dieser Wärmequelle wäre offensichtlich mit dramatischen Folgen für die Alte Welt verbunden. Dieses Szenario schlachtet der Film »The day after tomorrow« aus, übertreibt dabei aber vor allem in der Schnelligkeit der Entwicklung maßlos.

Die Klimaforscher sehen die Gefahr längst nicht so dramatisch. Ihren Abschätzungen nach ist vor 2100 kaum mit einem Kollaps der thermohalinen Nordatlantik-Strömung zu rechnen. Zwar wird sich der Strom wohl kontinuierlich abschwächen. Die geringere Wärmezufuhr aus tropischen Gewässern wird in Europa aber durch die generelle Zunahme der globalen Temperatur ausgeglichen. Alles in allem dürfte sich am thermischen Regime über unserem Kontinent nichts allzu dramatisch ändern. Für kommende Jahrhunderte bleibt eine fatale Änderung des Strömungsmusters jedoch nicht ausgeschlossen.

DPA

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

### Bedrohung für Trinkwasser und Gesundheit

Ein anderes nicht-lineares System, das klassisch rückgekoppelt ist und sich selbst verstärken könnte, ist die mögliche Freisetzung von Methan aus auftauenden Permafrostböden. In Form von Gashydraten lagern große Mengen des zweitwichtigsten Treibhausgases in Permafrostgebieten wie Sibirien und in Tiefsee-Sedimenten. Dort sind mehr als die tausendfache Menge des derzeit in der Erdatmosphäre befindlichen Methans gebunden. Die Stärke und die Folgen einer möglichen Rückkopplung sind noch nicht vollständig geklärt, doch eine Freisetzung könnte unabsehbare Konsequenzen haben.

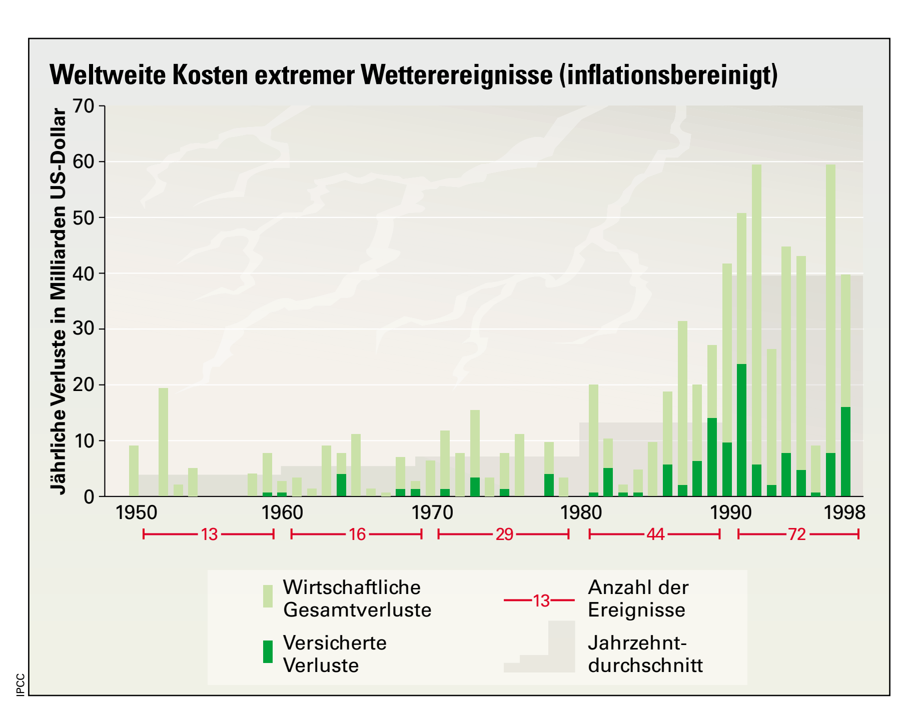
Versucht man die Auswirkungen des Klimawandels in ihrer gesamten Breite und Vielfalt zu erfassen, wird eines schnell klar: Das hochkomplexe Klimasystem Erde ist nur schwer zu modellieren, und die Phänomene sind so eng vernetzt, dass die möglichen Klimafolgen schier unüberschaubar sind. Auch viele von Menschen geschaffene Systeme und Einrichtungen werden von den Folgen des Klimawandels beeinträchtigt werden. Dazu zählen neben der Land- und Forstwirtschaft die Verfügbarkeit von Süßwasserressourcen, die Bedrohung von Siedlungen und nachteilige Einflüsse auf die menschliche Gesundheit.

Durch veränderte klimatische Bedingungen wird sich zum Beispiel die jährlich von Flüssen transportierte Wassermenge ändern. In hohen geografischen Breiten und in Südostasien wird es genug Wasser geben. In Zentralasien, Südafrika, im Mittelmeergebiet sowie in Australien wird das kostbare Nass hingegen spärlicher fließen. Der Klimawandel verstärkt mithin das in ariden und semiariden Regionen bereits bestehende Wasserdefizit. Während derzeit 1,7 Milliarden Menschen unter Wassermangel leiden, werden es bis 2025 bereits 5 Milliarden sein. Die Zunahme von Starkniederschlägen erhöht zudem die Hochwassergefahr. Am anfälligsten hierfür sind nicht-nachhaltig oder überhaupt nicht bewirtschaftete Systeme ohne Schutz der Wasserressourcen und -qualität, also in den armen und ärmsten Gebieten der Welt.

Ein zweites Beispiel: menschliche Gesundheit. Wasserverfügbarkeit, Wasserqualität und Nahrungsmittelversorgung sind hier die kritischen Faktoren. Gesundheitlich leiden werden Menschen durch größeren Hitzestress, höhere Luftfeuchtigkeit und – an einigen Orten – stärkere Luftverschmutzung. Dies erhöht vor allem die Erkrankungshäufigkeit und Sterberaten der älteren, vorgeschädigten, urbanen Bevölkerung und kann zu einer Verschiebung erhöhter Sterberaten vom Winter in den Sommer führen. Darüber hinaus wird das Risiko steigen, sich bestimmte Infektionskrankheiten einzufangen. Wegen fehlenden Zugangs zu sauberem Trinkwasser und durch die Ausweitung der Verbreitungsgebiete bestimmter Erreger (Malaria, Denguefieber, Leishmaniosen, Hirnhautentzündung, Cholera, Diarrhöe) werden auch hier besonders die einkommensschwachen, hauptsächlich tropischen und subtropischen Staaten und deren Menschen am stärksten betroffen sein.

◀ **Nicht mehr ohne Schirm? Die Häufigkeit von Starkniederschlägen wird zunehmen.**

▶ **Die wirtschaftlichen Verluste durch Wetterkatastrophen haben sich weltweit von den 1950er bis zu den 1990er Jahren etwa verzehnfacht. Ursache ist das Zusammenwirken von sozioökonomischen Faktoren (wie Bevölkerungswachstum, gestiegener Wohlstand, Urbanisierung in verwundbaren Gebieten) mit Klimafaktoren (beispielsweise Niederschlagsänderungen und Überflutungen).**




IPCC

Wie geht man nun um mit der Klimakrankheit unseres Planeten? Wie können wir die schlimmsten Folgen des Klimawandels mildern? Lassen sich die Ursachen der globalen Veränderungen überhaupt bekämpfen?

Eine Antwort muss sein: Wir brauchen eine globale, eine planetare Politik. Denn grundsätzlich gibt es nur zwei Möglichkeiten, auf die Herausforderung einschneidender Klimaänderungen zu reagieren: Anpassung (in der englischen Fachsprache: *adaptation*) an das scheinbar Unvermeidliche und effizientes Gegensteuern durch nachhaltige Maßnahmen (*mitigation*).

Anpassung würde zum Beispiel bedeuten, Deiche und Überflutungspolder zu bauen, um sich gegen den Anstieg des Meeresspiegels und gegen häufigere Überschwemmungen zu schützen. Dort, wo sich Temperatur und Niederschlagszonen ändern, müssten sich Besiedlung und Landwirtschaft darauf einstellen. In Gegenden, in denen Dürren, Flutkatastrophen und Stürme zunehmen, muss die Infrastruktur für eine möglichst weit gehende Minimierung der Schäden sorgen. Doch durchgreifend wäre solches Handeln nicht. Es würde letztlich nur die Symptome der Erkrankung bekämpfen.

## Klimaschutz aus Eigeninteresse

Das Übel wirklich an der Wurzel zu packen, die Ursachen zu bekämpfen, heißt effiziente und nachhaltige Maßnahmen zu treffen, die den Anstieg der globalen Temperaturen bremsen oder gar verhindern. Der entscheidende chirurgische Schnitt in das System Mensch-Planet-Erde kann daher nur bei der wichtigsten Ursache ansetzen: dem anthropogenen Kohlendioxid-Ausstoß, besonders jenem aus der Verbrennung fossiler Energieträger. Nur eine langfristige Reduktion dieser Emissionen kann die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre stabilisieren und damit die negativen Klimafolgen mildern.

Hier begegnen sich nun zwei Bereiche, die unterschiedlicher kaum sein könnten: die Wissenschaft, welche die geophysikalischen Prozesse im Klimasystem betrachtet und den Planeten Erde als Ganzes zum Forschungsobjekt hat, und die Politik einer inzwischen in planetaren Größenordnungen agierenden menschlichen Gesellschaft. Rasch, durchgreifend und dauerhaft muss die Reaktion der Nationen sein, um die Nachteile durch einen globalen Klimawandel so klein wie möglich zu halten. Dies geht nur, wenn weltweites Einvernehmen über die Ziele herrscht und wenn möglichst alle Betroffenen an einem Strang ziehen. Instrument kann hier nur die multilaterale, die internationale Politik sein.

Klimaschutz ist in der Tat einer der dynamischsten und schwierigsten Bereiche der internationalen Umweltpolitik. Der IPCC nimmt dabei eine Musterrolle ein: Kein anderes Gremium in der internationalen Politik, das wissenschaftliche Expertise und politische Entscheidungsträger zusammenfasst, kann eine so erfolgreiche Geschichte aufweisen wie der Sachverständigenrat. Tatsächlich wurden auf dem Weltgipfel 1992 die Grundlagen für das Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen geschaffen, das 1995 in Kraft trat und das mit mehr als 180 Vertragsstaaten praktisch die gesamte Staatengemeinschaft umfasst. Weniger einig ist man sich freilich beim 1997 in Japan gezeichneten Kioto-Protokoll (Kasten auf S. 33), dessen Ausgestaltung mehr als vier Jahre in Anspruch nahm. Derzeit lehnen die USA – der weltweit größte Emittent von Treibhausgasen – die Vereinbarungen des Protokolls ab.

Globales menschliches Handeln hat in diesen ersten Jahrzehnten des dritten Jahrtausends erstmals spürbare Folgen für die Erde als Ganzes. Die »planetare Krankheit« Klimawandel ist die erste neue Herausforderung für eine globale Gesellschaft, die den Planeten nicht dauerhaft beschädigen will. Und das sollte sie aus wohlverstandenem Eigeninteresse tunlichst vermeiden. ◁

**AUTOREN UND LITERATURHINWEIS**





**Harald Kohl** und **Helmut Kühr** haben beide in Physik promoviert. Kohl ist Referent im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in Berlin. Er war bis 2003 für wissenschaftlich-technische Fragen der internationalen Klimapolitik zuständig und leitete als deutscher »National Focal Point« die Regierungsverhandlungen im Rahmen des IPCC. Kühr forschte zwischen 1975 und 1988 an mehreren Max-Planck-Instituten sowie in den USA. Er leitet die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle beim Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum in Bonn.



Anthropogener Klimawandel. Von Ulrich Cubasch und Dieter Kasang. Klett-Perthes, Gotha 2000


Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

SATELLITENFERNSEHEN

# Die Erlebnis-Schüssel

**Hässlich, aber beliebt: Ein großer Teil der Haushalte empfängt das Fernsehprogramm via Satellitenschüssel.**

Von Bernhard Gerl

Ein gut ausgebautes Netz von Funksendern und Antennen auf den Dächern versorgte bis 1984 deutsche Haushalte mit Fernsehprogrammen. Doch als Privatsender auf den Markt drängten, kamen neue Techniken auf. Denn erstens standen kaum mehr freie Funkkanäle zur Verfügung, zweitens wäre es zu aufwändig gewesen, ein weiteres flächendeckendes Netz von Sendeanlagen aufzubauen. Heute versorgt die Satellitentechnik rund 40 Prozent der insgesamt 36,2 Millionen TV-Haushalte in Deutschland, das Kupferkabel etwa 55 Prozent.

Die Fernsehanstalten senden ihre Programme über große Parabolantennen einem Kommunikationssatelliten zu. Dieser verteilt die Signale auf typischerweise 16 bis 72 Kanäle, über die er Informationen per Richtantennen zur Erde funkt. Die werden dazu einem Trägersignal »aufmoduliert« – das hochfrequente Nutzsignal überlagert ein Grundsignal und verändert je nach Verfahren seine Amplitude oder Frequenz. Bei der herkömmlichen Funkübertragung von Sendemast zu Sendemast geschieht das zwar auch, doch insgesamt mit höherer Frequenz. Deshalb lassen sich die Daten dichter packen. Für die Fernsehübertragung steht der Bereich von 10,7 bis 12,75 Gigahertz zur Verfügung, während es auf der Erde 170 bis 600 Megahertz sind. Jeder einzelne Kanal der Satellitenübertragung benötigt eine Bandbreite zwischen 27 und 75 Megahertz – um diesen Wert schwankt die Trägerfrequenz hin und her – und kann bis zu 155 Millionen Informationseinheiten pro Sekunde übertragen.

Ein Fernsehsatellit kreist in 24 Stunden geostationär in 35786 Kilometer Höhe einmal um die Erde. Vom Erdboden aus scheint er deshalb an einem Punkt fixiert, sodass ein Nachführen der Satellitenschüssel entfällt. Anhand des Längengrads, über dem der Satellit senkrecht steht, wird die Antenne ausgerichtet. Eine »Sichtverbindung« als kürzeste Distanz ist wichtig, denn die Atmosphäre schwächt die Signale.

Die bekannten Schüsseln sind Reflektoren, die eingehende Signale auf die in ihrem Brennpunkt stehende, eigentliche Antenne bündeln. Je größer der Durchmesser des Reflektors, desto höher ist die verwertbare Intensität; hier zu Lande reichen sechzig Zentimeter für den privaten Gebrauch meist aus.

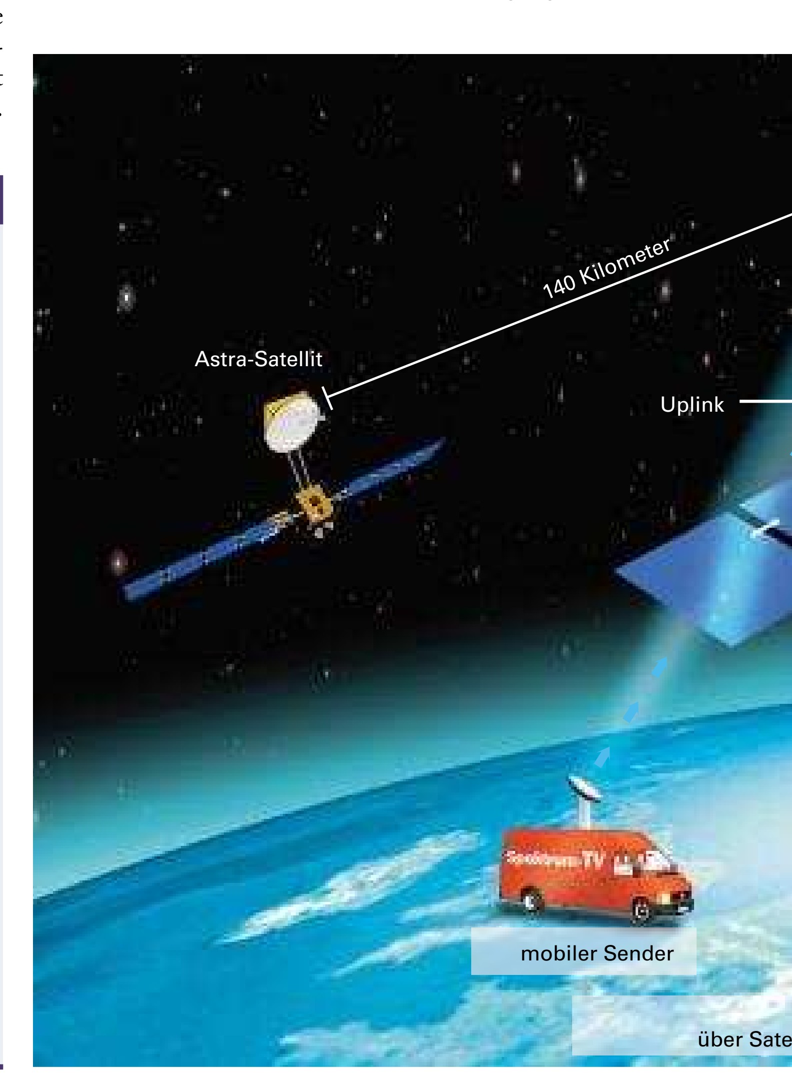
Noch in der Antenne filtert ein so genannter Low-Noise-Converter (LNC) Rauschen aus dem Nutzsignal und setzt das Ergebnis auf eine niedrigere Trägerfrequenz, die in den nachfolgenden elektrischen Leitungen im Haus weniger stark gedämpft wird. Als letztes Element der Übertragungskette kon-

## Die Satellitenbetreiber

▶ **Astra** bezeichnet die Satelliten der privaten luxemburgischen Gesellschaft SES. Sie ist mit einem Marktanteil von 90 Prozent der größte Betreiber für deutsche Privathaushalte, beim Digitalfernsehen sind es sogar 99 Prozent. Sieben Astra-Satelliten übertragen auf mehr als hundert Kanälen sowohl analoge als auch digitale Fernseh- und Radioprogramme, die Sendeleistung reicht von etwa 60 bis 80 Watt.

▶ **Eutelsat** (European Telecommunication Satellite Organisation) heißt die Organisation von 26 europäischen Postverwaltungen, die in Zusammenarbeit mit der Esa (European Space Agency) den Aufbau eines Telekommunikationssystems innerhalb Europas koordiniert hat. Die Satelliten können 12000 Ferngespräche oder 10 Hörfunk- und Fernsehprogramme übertragen. Wegen der enormen Sendeleistung von 110 Watt ist der Empfang von Eutelsat mit Satellitenschüsseln unter 60 Zentimeter Durchmesser in ganz Europa möglich.

▶ **Intelsat** (Intercontinental Telecommunication Satellite Organisation) wurde 1964 gegründet, um ein globales Satellitennetz für die Übertragung von Fernsehsendungen und Telefongesprächen zu schaffen. Heute hat das Konsortium 144 Mitgliedsstaaten. Die für den deutschsprachigen Raum relevanten Satelliten senden nur mit einer Leistung von 32 Watt. Das reicht nicht für den privaten Empfang, die Signale werden aber in das Kabelnetz eingespeist.



vertiert ein Receiver das Signal so, dass Fernsehgeräte es verstehen.

Satellitenstrecken übertragen analoge wie digitale Fernsehprogramme; tatsächlich wuchs der Markt im vergangenen Jahr hauptsächlich im digitalen Bereich. Diese Technik ermöglicht auch schnelle Internetverbindungen oder interaktives Fernsehen. Bislang ist es aber nur möglich, via Satellit Daten zu empfangen. Damit Privathaushalte auch Signale an Satelliten verschicken können, benötigen sie entsprechende Sender, die derzeit noch nicht kommerziell verfügbar sind. ◁

Der Physiker **Bernhard Gerl** arbeitet als Fachautor in Regensburg.

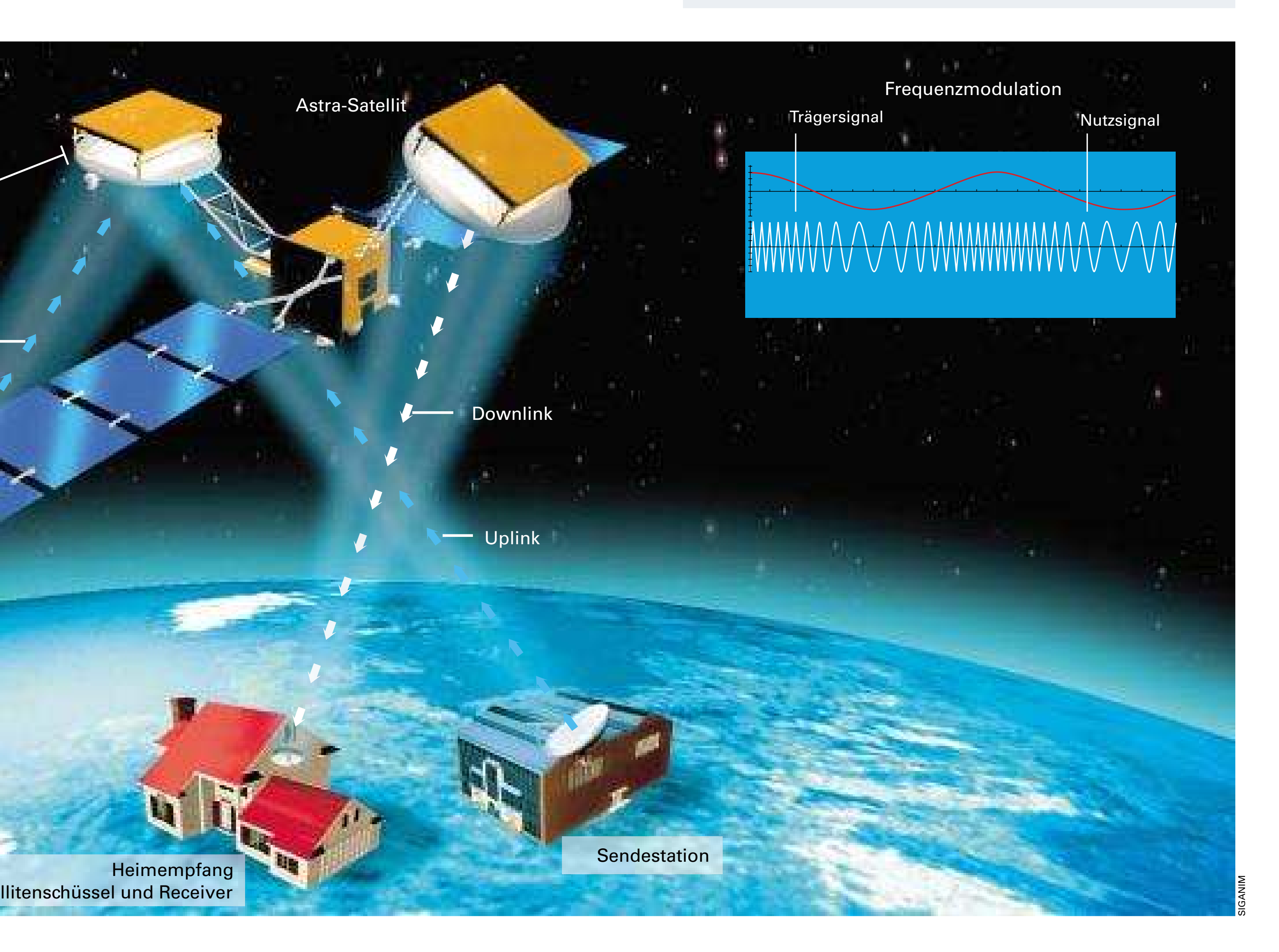
## WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **Liegen zwei Frequenzbänder** nahe beieinander, stören sie sich gegenseitig. Stehen die Schwingungsebenen der Signale aber senkrecht zueinander, lassen sie sich gut voneinander unterscheiden. Dank solcher Polarisierung kann jedes Frequenzband zweimal belegt werden.

▶ **Auch digitales Fernsehen** wird per Satellit übertragen. Die Informationen sind nach dem MPEG-2-Standard (Moving Pictures Expert Group) komprimiert. Dabei werden zum Beispiel nur Veränderungen eines Fernsehbilds zum vorangegangenen berücksichtigt. Das reduziert die zu sendende Datenmenge auf bis zu ein Sechzigstel. Ein einzelner Satellit vermag bis zu 120 digitale Fernseh- oder über 3000 digitale Radioprogramme in einer der analogen vergleichbaren Qualität zu übertragen.

▶ **Der Betrieb eines Satellitennetzes** ist eine kostspielige Angelegenheit. Denn nach etwa 10 bis 15 Jahren ist der Treibstoff verbraucht, den die Raumfahrzeuge brauchen, um ihre Bahn zu stabilisieren. Solarzellen liefern in dieser Zeit die Energie für Elektronik und Sendeantennen. Zudem speisen sie die Akkus, die den Strom liefern, solange sich der Satellit im Schatten der Erde aufhält.

**▼ Rundfunkanstalten und Satellitenbetreiber schicken Signale über 4,5 bis 15 Meter große Parabolantennen zum Satelliten; die Frequenz beträgt 13 bis 18 Gigahertz, die Sendeleistung ist mit 500 Watt relativ hoch. Die Informationen werden dabei einer Trägerwelle »aufmoduliert«. Der künstliche Trabant verteilt die Daten auf einzelne Frequenzkanäle und sendet sie in Richtung Erde zurück. Ein Privathaushalt empfängt die Signale mit sechzig bis achtzig Zentimeter großen Satellitenschüsseln. Die Daten werden gefiltert, umgewandelt und über einen Receiver in das Fernsehgerät gespeist.**




SIGANIM

TEIL III A

# Das Tempo der Expansion

Aus der scheinbaren Helligkeit weit entfernter Supernovae schließen Astronomen auf einen entscheidenden Wendepunkt in der Entwicklung des Kosmos. Damals ging eine lange Phase gebremster Ausdehnung in die gegenwärtige Epoche beschleunigter Expansion über.

Von Adam G. Riess und Michael S. Turner

Spätestens seit Isaac Newton im 17. Jahrhundert sein Gravitationsgesetz formulierte, galt die Schwerkraft als Urbild einer rein anziehenden Kraft. Sie drückt uns auf den Boden, verlangsamt den Aufstieg jedes Wurfgegenstands und sorgt dafür, dass der Mond auf seiner Bahn um die Erde bleibt. Die Gravitation hält nicht nur unser Sonnensystem zusammen, sondern bindet auch ganze Galaxien und riesige Galaxienhaufen. Zwar lässt Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie im Prinzip auch eine abstoßende Wirkung der Schwerkraft zu, doch darin sahen die meisten Physiker eine rein theoretische Möglichkeit, die mit dem gegenwärtigen Universum nichts zu tun habe.

Bis vor kurzem glaubten die Astronomen einhellig, die Gravitation verlangsame die Expansion des Kosmos. Doch 1998 entdeckten Forscher die abstoßende Seite der Schwerkraft. Beim sorgfältigen Beobachten weit entfernter Supernovae – Sternexplosionen, die für kurze Zeit so hell strahlen wie zehn Milliarden Sonnen – stellte sich heraus, dass sie uns schwächer erscheinen als erwartet. Die plausibelste Erklärung für diese Diskrepanz ist: Das Licht der vor Jahrmilliarden explodierten Supernovae musste einen längeren Weg zurücklegen, als die Theoretiker vorausgesagt hatten. Daraus wiederum folgt, dass die Expansion des Universums sich in Wirklichkeit nicht verlangsamt, sondern beschleunigt.

**SERIE**

**Der beschleunigte Kosmos**

**Im Mai-Heft**
**Teil I: Die Symphonie der Schöpfung**

**Im Juni-Heft**
**Teil II: Galaktische Wände und Blasen**

**> In diesem Heft**
**Teil III: Dunkle Energie und verborgene Dimensionen**

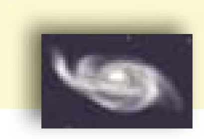
### Abstoßende Schwerkraft?

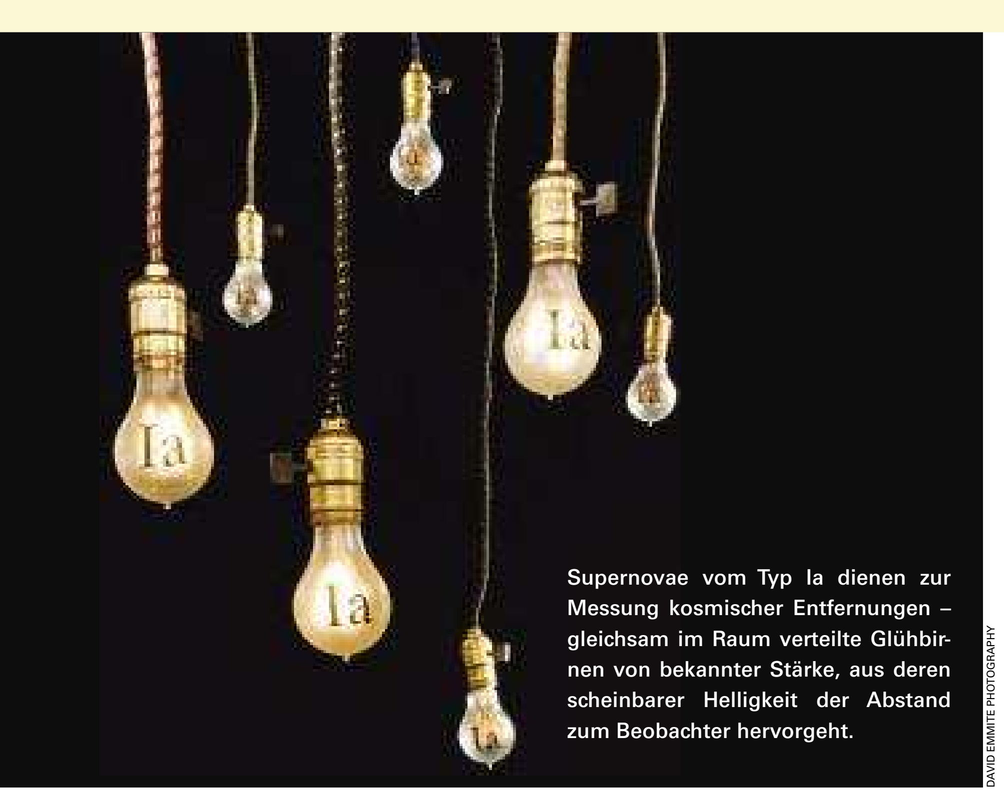
Einigen Kosmologen war dieser Befund zunächst zu radikal; sie wollten das Defizit der Supernova-Helligkeit auf andere Effekte zurückführen – etwa auf eine Schwächung des Lichts durch intergalaktischen Staub. Doch in den letzten Jahren haben die Astronomen mit dem Vermessen immer fernerer Supernovae die Existenz der kosmischen Beschleunigung zweifelsfrei bestätigt.

Die Frage ist nun: Hat das Tempo der kosmischen Expansion schon seit Anbeginn des Universums zugenommen – oder erst seit relativ kurzer Zeit, das heißt seit rund fünf Milliarden Jahren? Die Antwort hat tief greifende Konsequenzen. Falls sich herausstellt, dass die Expansion seit jeher beschleunigt ablief, muss die Geschichte des Kosmos komplett umgeschrieben werden. Wenn sich die Beschleunigung aber – wie die Kosmologen erwarten – als relativ spätes Phänomen entpuppt, ließe sich vielleicht die Ursache herausfinden und womöglich auch die größere Frage nach dem künftigen Schicksal des Universums beantworten. Dazu müsste man wissen, wann und wie die Phase beschleunigter Expansion begann.

Vor fast 75 Jahren entdeckte der Astronom Edwin Hubble die Expansion des Universums, als er beobachtete, dass sich die Galaxien von uns entfernen – und zwar umso schneller, je weiter entfernt sie sind. Das nach Hubble benannte Gesetz besagt: Die relative Geschwindigkeit ist gleich Entfernung mal Hubble-Konstante. In der Sprache von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie ist das Hubble-Gesetz einfach eine Folge der gleichförmigen Expansion des Raumes (Bild S. 44).

In Einsteins Theorie wirkt die Gravitation für alle bekannten Formen von Materie und Energie als anziehende Kraft – selbst in kosmischem Maßstab. Daraus folgt, dass die Expansion des Alls sich in einem Maße verlangsamt, das von der gesamten darin enthaltenen Materie- und Energiedichte abhängt. Aber die Allgemeine Relativitätstheorie schließt auch die Möglichkeit von seltsa-






Supernovae vom Typ Ia dienen zur Messung kosmischer Entfernungen – gleichsam im Raum verteilte Glühbirnen von bekannter Stärke, aus deren scheinbarer Helligkeit der Abstand zum Beobachter hervorgeht.

DAVID EMMITE PHOTOGRAPHY

men Energieformen nicht aus, die eine abstoßende Schwerkraft erzeugen (Kasten S. 45). Die Entdeckung der beschleunigten Expansion weist auf eine solche Energieform hin – die so genannte Dunkle Energie.

Ob die Expansion sich mit der Zeit beschleunigt oder verlangsamt, hängt von einem Kampf zwischen zwei Giganten ab – der Gravitationsanziehung der Materie und der abstoßenden Kraft der Dunklen Energie. Dabei kommt es auf die Dichte der beiden an. Die Dichte der Materie nimmt im Lauf der kosmischen Expansion ab, weil das Volumen des Raumes zunimmt. Zur Materiedichte tragen übrigens strahlende Himmelsobjekte nur einen kleinen Bruchteil bei; der Großteil besteht aus so genannter Dunkler Materie, die eine anziehende Schwerkraft ausübt, aber ansonsten mit gewöhnlicher Materie oder Strahlung nicht merklich in Wechselwirkung tritt.

Über den großen Gegenspieler, die Dunkle Energie, ist nicht viel mehr bekannt, als dass sich ihre Dichte mit der Expansion des Alls höchstens geringfügig ändert. Gegenwärtig ist diese Dichte höher als die der Materie, aber in ferner Vergangenheit dürfte die Materiedichte dominant gewesen sein und die kosmische Expansion gebremst haben (siehe Kasten S. 46).

Die Kosmologen haben gute Gründe für die Annahme, dass sich die Expansion des Universums nicht immer beschleunigt hat. Andernfalls wäre die Existenz der gegenwärtigen kosmischen Strukturen nicht zu erklären. Nach der gängigen kosmologischen Theorie entwickelten sich Galaxien, Galaxienhaufen und noch größere Strukturen aus kleinen Inhomogenitäten der Materiedichte im frühen Universum, die sich noch heute durch kleine Temperaturunterschiede in der kosmischen Hintergrundstrahlung verraten.

Die stärkere Gravitationsanziehung der dichteren Materieregionen verhinderte deren Expansion und führte zur Bildung gravitativ gebundener Objekte – von Galaxien wie unserer Milchstraße bis zu gewaltigen Galaxienhaufen. Wäre die kosmische Expansion hingegen immer beschleunigt abgelaufen, hätte sie das Entstehen dieser Strukturen schon von vornherein verhindert. Außerdem würden bei permanenter Beschleunigung zwei entscheidende Aspekte des frühen Kosmos – das Variationsmuster der Hintergrundstrahlung und die Produktion der leichtesten Elemente in den ersten Sekunden nach dem Urknall – nicht mit unseren Beobachtungen übereinstimmen.

### Jagd nach Sternexplosionen

Trotzdem ist es wichtig, nach direkten Belegen für eine frühere Phase verlangsamter Expansion zu suchen. Solche Indizien würden zum einen das kosmologische Standardmodell untermauern und zum anderen Hinweise auf die tiefere Ursache für die gegenwärtige Epoche kosmischer Beschleunigung liefern. Da Teleskope in die Vergangenheit schauen, wenn sie das Licht ferner Sterne und Galaxien sammeln, können die Astronomen damit die Expansionsgeschichte des Alls erforschen.

Diese Geschichte geht aus der Beziehung zwischen der Entfernung der Galaxien und der Geschwindigkeit ihrer Fluchtbewegung hervor. Wenn sich die Expansion verlangsamt, ist die Fluchtgeschwindigkeit einer fernen Galaxie größer als nach dem Hubble-Gesetz zu erwarten. Bei beschleunigter Expansion liegt die beobachtete Geschwindigkeit unter dem Hubble-Wert. Oder anders ausgedrückt: Eine Galaxie mit gegebener Fluchtgeschwindigkeit ist weiter entfernt als erwartet – und somit schwächer –, falls das All beschleunigt expandiert.

Um von dieser einfachen Tatsache Gebrauch zu machen, benötigt man astronomische Objekte, deren absolute Helligkeit – pro Sekunde produzierte Strahlungsmenge – bekannt ist und die überall im Universum zu finden sind. Eine spezielle Klasse von Supernovae namens Typ Ia erfüllt beide Bedingungen. Diese Sternexplosionen strahlen so hell, ▷

## IN KÜRZE

▶ Im Jahr 1998 zeigten Beobachtungen an fernen Supernovae, dass **die Expansion des Universums** sich beschleunigt. Seither haben Astronomen diese Entdeckung weiter untermauert.

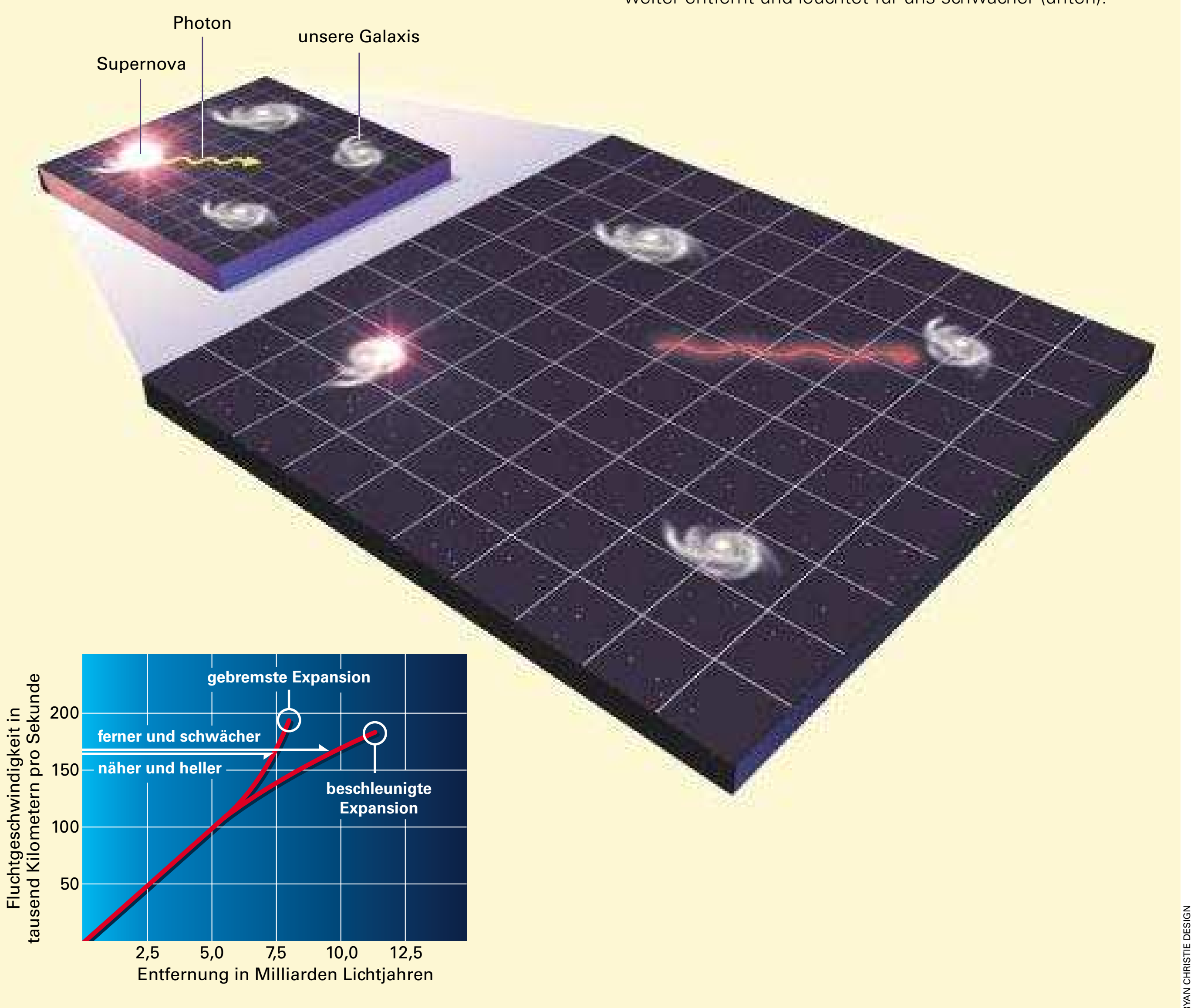
▶ Durch die **Untersuchung noch weiter entfernter Supernovae** fanden die Forscher heraus, dass die Expansion sich verlangsamte, bevor sie schneller wurde – genau wie die Kosmologen vorausgesagt hatten.

▶ **Die Bestimmung des Zeitpunkts,** an dem die Verlangsamung in Beschleunigung überging, gibt vielleicht Auskunft über das Wesen der Dunklen Energie und das künftige Schicksal des Universums.

## Wie schnell dehnt sich der Weltraum aus?

**Angenommen, in einer fernen Galaxie** explodierte eine Supernova, als das Universum nur halb so groß war wie heute (links). Wenn die von der Explosion erzeugte Strahlung unsere Galaxis erreicht, hat sich die Wellenlänge der Strahlung verdoppelt – das Licht ist zum roten Teil des Spektrums verschoben (rechts).

**Die Galaxien** sind hier nicht maßstabsgerecht dargestellt; der Abstand zwischen ihnen wäre in Wirklichkeit viel größer. Falls die Expansion des Universums sich verlangsamt, ist die Supernova weniger weit entfernt und erscheint heller als erwartet; falls die Expansion sich beschleunigt, ist die Supernova weiter entfernt und leuchtet für uns schwächer (unten).



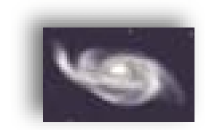

BRYAN CHRISTIE DESIGN

▷ dass sie von irdischen Teleskopen und erst recht vom Hubble-Weltraumteleskop in den tiefsten Tiefen des sichtbaren Universums aufgespürt werden können. Im vergangenen Jahrzehnt haben Astronomen die absolute Helligkeit der Ia-Supernovae sorgfältig geeicht; darum lässt sich die Entfernung aus der scheinbaren Helligkeit präzise ermitteln.

Die Fluchtgeschwindigkeit einer Supernova ergibt sich aus der Rotverschiebung des Lichts, das ihre Heimatgalaxie aussendet. Die Strahlung von Objekten, die sich entfernen, wird zu längeren Wellenlängen verschoben, das heißt zu Rot hin. Zum Beispiel verdoppelt sich die Wellenlänge von Licht, das ausgesandt wurde, als das Universum halb so groß war wie heute.

### Supernovae – je älter, desto besser

Indem die Forscher die Rotverschiebung und die scheinbare Helligkeit zahlreicher unterschiedlich weit entfernter Supernovae messen, können sie eine Geschichte der kosmischen Expansion schreiben. Leider sind Supernovae vom Typ Ia selten: In einer Galaxie wie unserer Milchstraße tritt nur alle paar Jahrhunderte eine einzige auf. Supernova-Jäger beobachten daher immer wieder einen Himmelsausschnitt, der Tausende von Galaxien enthält, und vergleichen die Bilder. Ein plötzlich auftauchender Lichtpunkt könnte eine Supernova sein. Die 1998 gefundenen Indizien für kosmische Be-



schleunigung wurden von zwei Teams gefunden, die Supernovae aus einer Zeit entdeckten, als das Weltall rund zwei Drittel seiner heutigen Größe hatte – vor etwa fünf Milliarden Jahren.

Einige Wissenschaftler fragten sich allerdings, ob die Teams die Daten richtig interpretiert hatten. Konnte nicht ein anderer Effekt als die kosmische Beschleunigung die Supernovae schwächer leuchten lassen als erwartet? Auch intergalaktischer Staub könnte das Licht ferner Supernovae trüben. Oder vielleicht waren solche vor langer Zeit entstandenen Supernovae von sich aus lichtschwächer, weil das Universum damals chemisch anders zusammengesetzt war als heute – mit einem geringeren Anteil an den schweren Elementen, die durch Kernreaktionen in Sternen entstehen.

Zum Glück gibt es einen guten Test für die konkurrierenden Hypothesen. Wenn Supernovae auf Grund einer astrophysikalischen Ursache schwächer scheinen – weil sie von allgegenwärtigem Staub abgeschirmt werden oder in früheren Epochen von vornherein schwächer zu leuchten begannen –, dann müssten diese Effekte mit steigender Rotverschiebung zunehmen. Wenn hingegen eine kosmische Beschleunigung dahinter steckt, die erst nach einer Ära gebremster Expansion begonnen hat, müssen die aus der früheren Verlangsamungsperiode stammenden Supernovae relativ heller erscheinen. Daher vermag die Beobachtung von Supernovae, die explodierten, als das All weniger als zwei Drittel seiner heutigen Größe hatte, zwischen den Hypothesen zu unterscheiden. Natürlich wäre prinzipiell auch ein unbekanntes astrophysikalisches Phänomen denkbar, das exakt die Effekte von Beschleunigung und Verlangsamung simuliert, aber Wissenschaftler halten nicht viel von solchen künstlich abgestimmten Erklärungen.

Derart urtümliche und weit entfernte Supernovae sind freilich schwer zu finden. Eine Ia-Supernova, die explodierte, als das Universum die Hälfte seiner heutigen Größe hatte, ist nur ein Zehnmilliardstel so hell wie Sirius, der hellste Stern am Himmel. Irdische Teleskope können solche Objekte nicht zuverlässig entdecken, aber glücklicherweise gibt es das Hubble-Weltraumteleskop. Im Jahr 2001 gab einer von uns (Riess) bekannt, dass das Instrument zufällig mehrere Bilder einer extrem fernen Ia-Supernova – mit der Nummer SN 1997ff – aufgenommen hatte. Aus der Rotverschiebung des Lichts dieser Sternexplosion ging hervor, dass sie vor zehn Milliarden Jahren stattfand, als das Universum ein Drittel seiner heutigen Größe hatte – und das Objekt erschien viel heller, als es nach der Staub-Hypothese hätte sein dürfen. Dieses Resultat war der erste direkte Hinweis auf die Verlangsamungsepoche. Wir beide schlugen Beobachtungen weiterer Supernovae mit hoher Rotverschiebung vor, um den definitiven Beweis zu erhalten und den Übergang von Verlangsamung zu Beschleunigung zu bestimmen.

### Beginn der Beschleunigung: vor fünf Milliarden Jahren

Die Advanced Camera for Surveys, ein 2002 am Weltraumteleskop installiertes Instrument, machte Hubble zu einem regelrechten Supernova-Jagdgerät. Um die erforderliche Stichprobe weit entfernter Ia-Supernovae zu sammeln, leitete Riess ein Programm, das sich die Daten der tiefen Durchmusterung eines kleinen Himmelsfeldes namens Great Observatories Origins Deep Survey zu Nutze machte.

Das Team fand sechs Supernovae, die aus einer Zeit vor mehr als sieben Milliarden Jahren stammten; damals hatte das Universum weniger als die Hälfte seiner heutigen Ausdehnung. Zusammen mit SN 1997ff sind dies die entferntesten Ia-Supernovae, die je entdeckt wurden. Die Beobachtungen bestätigten die Existenz einer früheren Periode gebremster Expansion und legten den Übergang von Verlangsamung zu Beschleunigung in eine Zeit vor fünf Milliarden Jahren (siehe Kasten S. 46). Das passt zu den theoretischen Erwartungen und beruhigt die Kosmologen. Die kosmische Beschleunigung war eine große Überraschung und bleibt in mancher Hinsicht ein ungelöstes Rätsel. Doch so überraschend, dass wir unser Bild vom Kosmos über Bord werfen müssten, ist sie auch wieder nicht.

Die urtümlichen Supernovae lieferten auch neue Erkenntnisse über die Dunkle Energie, den Grund der kosmischen Beschleunigung. Die favorisierte Deutung der Dunklen Energie beruft sich auf die Vakuumenergie; mathematisch entspricht sie der kosmologischen Konstante, die Einstein 1917 einführte, ▷

## Wie kann Gravitation abstoßend wirken?

**In der Newton'schen Theorie** ist die Schwerkraft stets anziehend, und ihre Stärke hängt nur von der Masse des anziehenden Objekts ab. Doch in der Theorie Einsteins wird die Stärke der Gravitationsanziehung auch durch die Zusammensetzung des Gegenstands beeinflusst, der sie hervorruft. Physiker charakterisieren die Zusammensetzung einer Substanz durch ihren inneren Druck.

**Die Schwerkraft eines Objekts** ist proportional zu seiner Energiedichte plus dem Dreifachen des Drucks. Unsere Sonne zum Beispiel ist eine heiße Gaskugel mit positivem – nach außen gerichtetem – Druck; weil der Gasdruck mit der Temperatur ansteigt, ist die Gravitationsanziehung der Sonne geringfügig größer als die einer kalten Materiekugel mit gleich großer Masse. In einem Gas aus Photonen herrscht hingegen ein Druck, der einem Drittel der Energiedichte entspricht; darum ist in diesem Fall die Anziehungskraft doppelt so groß wie die einer äquivalenten Masse aus kalter Materie.

**Die Dunkle Energie** zeichnet sich durch ihren negativen Druck aus. Auch elastische Gegenstände – etwa ein Gummituch – haben einen negativen, das heißt nach innen gerichteten Druck.

Wenn der Druck unter minus ein Drittel der Energiedichte fällt, wird die Summe aus Energie und dreimal Druck negativ, und die Schwerkraft wirkt abstoßend. Da das Quantenvakuum einen Druck von minus eins mal Energiedichte besitzt, ist die Gravitation eines Vakuums stark abstoßend. Andere hypothetische Formen der Dunklen Energie haben einen Druck zwischen minus ein Drittel und minus eins mal Energiedichte. Einige dieser Energietypen wurden herangezogen, um die kosmische Inflation – eine sehr frühe Phase rapider kosmischer Beschleunigung – zu erklären. Andere Typen sind Kandidaten für die Dunkle Energie, von der die heutige Beschleunigung ihren Schwung bezieht.

▷ später allerdings wieder verwarf. Weil Einstein zunächst dachte, er müsse ein statisches Modell des Universums konstruieren – die kosmische Expansion war noch nicht entdeckt –, postulierte er die kosmologische Konstante, um die Gravitationsanziehung der Materie zu kompensieren. Nach diesem Rezept war die Dichte der Konstante halb so groß wie die der Materie. Doch um die beobachtete Beschleunigung des Universums zu erzeugen, muss die Konstante doppelt so groß sein wie die Materiedichte.

Woher könnte diese Energiedichte stammen? Aus dem Unbestimmtheitsprinzip der Quantenmechanik folgt, dass das Vakuum von Teilchen erfüllt ist, die quasi von geborgter Zeit und Energie leben, indem sie unentwegt auftauchen und sofort wieder verschwinden. Aber wenn Theoretiker versuchen, die Energiedichte dieses Quantenvakuums zu berechnen, kommen sie auf Werte, die um mindestens 55 Zehnerpotenzen zu groß sind. Wäre die Vakuumenergiedichte wirklich so hoch, müsste die gesamte Materie des Universums schlagartig auseinander fliegen, und niemals hätten sich Galaxien gebildet.

## Dunkle Energie als Retter in der Not

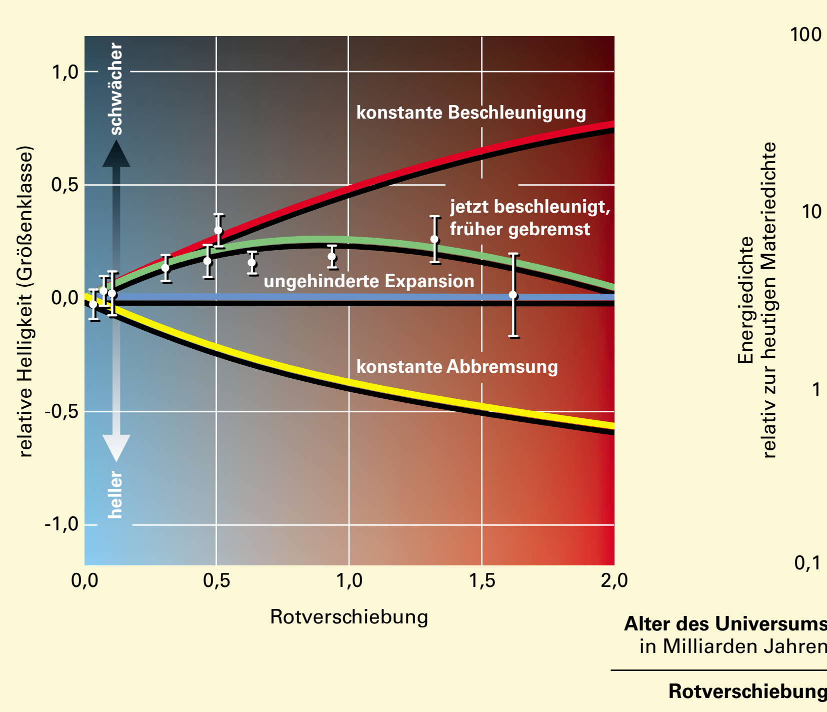
Diese Diskrepanz ist die schlimmste Peinlichkeit der theoretischen Physik genannt worden – aber sie könnte auch eine große Chance bedeuten. Zwar werden neue Versuche, die Vakuumenergiedichte abzuschätzen, vielleicht just den richtigen Wert ergeben, um die kosmische Beschleunigung zu erklären. Doch nach Überzeugung vieler Theoretiker wird eine korrekte Berechnung mit Hilfe eines neuen Symmetrieprinzips zu dem Schluss führen, dass die Energie des Quantenvakuums schlicht null ist: Auch ein Quanten-Nichts wiegt nichts. Falls das zutrifft, muss etwas anderes die Expansion beschleunigen.

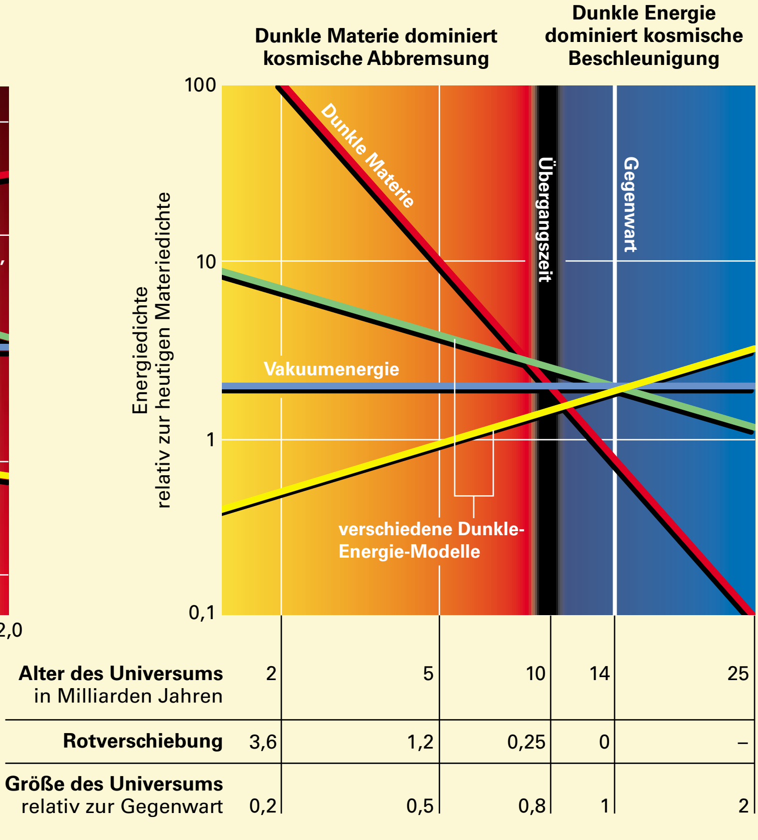
Theoretiker haben dazu vielerlei Vorschläge gemacht – vom Einfluss zusätzlicher verborgener Dimensionen bis zu einer neuen Naturkraft namens Quintessenz. Meist postulieren diese Modelle eine Dunkle Energiedichte, die nicht konstant ist, sondern im Lauf der Expansion abnimmt; es gibt aber auch die Idee, dass die Dunkle Energie mit der kosmischen Expansion anwächst. Die

## Der Übergang von verlangsamter zu beschleunigter Expansion

**Neuere Beobachtungen weit entfernter Supernovae** zeigen an, dass die Expansion des Universums sich zunächst verlangsamte und erst später begann, sich zu beschleunigen (links). Typ-Ia-Supernovae mit größeren Rotverschiebungen als 0,6 erscheinen heller, als zu erwarten wäre, wenn das Universum sich immer beschleunigt ausgedehnt hätte – oder wenn intergalaktischer Staub ihr Licht trüben würde. Jeder Datenbalken bezeichnet Supernovae mit fast gleicher Rotverschiebung.

**Die Resultate zeigen**, dass der Übergangspunkt zwischen Verlangsamung und Beschleunigung rund fünf Milliarden Jahre in der Vergangenheit liegt. Wenn die Astronomen diese Übergangsepoche präziser zu bestimmen vermöchten, könnten sie daraus ableiten, wie sich die Dichte der Dunklen Energie im Laufe der Zeit entwickelt hat, und vielleicht ihr geheimnisvolles Wesen ergründen (rechts).




| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Alter des Universums** in Milliarden Jahren | 2 | 5 | 10 | 14 | 25 |
| **Rotverschiebung** | 3,6 | 1,2 | 0,25 | 0 | – |
| **Größe des Universums** relativ zur Gegenwart | 0,2 | 0,5 | 0,8 | 1 | 2 |

BRYAN CHRISTIE DESIGN

wohl radikalste Idee besagt, die Dunkle Energie existiere gar nicht; vielmehr müsse Einsteins Gravitationstheorie modifiziert werden (siehe den nachfolgenden Artikel).

Da das zeitliche Verhalten der Dunklen Energie vom theoretischen Modell abhängt, ergibt jede Theorie einen anderen Zeitpunkt für den Übergang von verlangsamter zu beschleunigter Expansion. Wenn die Dunkle Energiedichte während der Expansion abnimmt, tritt der Übergang früher ein als bei einem Modell mit konstanter Dunkler Energiedichte. Auch die Modelle mit modifizierter Gravitation haben merkliche Auswirkungen auf diesen Zeitpunkt. Die neuesten Supernova-Daten passen zu Theorien mit konstanter Dunkler Energiedichte – aber auch zu den meisten Modellen mit variabler Dunkler Energiedichte. Nur Theorien, die starke Schwankungen dieser Größe postulieren, können jetzt ausgeschlossen werden.

DAS UNIVERSUM
VOR DEM URKNALL
(TATSÄCHLICHE GRÖSSE)

### Kosmische Zukunft – Kollaps oder Hyperbeschleunigung?

Um den theoretischen Spielraum einzuschränken, sammelt das Hubble-Weltraumteleskop weiter Supernova-Daten, welche die Details der Übergangsphase präzisieren könnten. Das Weltraumteleskop bleibt zwar das einzige Mittel, die Frühgeschichte der kosmischen Expansion zu erforschen, aber mehrere bodengestützte Programme versuchen die – zeitlich wie räumlich näher liegende – Beschleunigungsphase immer präziser auszumessen und dadurch das Geheimnis der Dunklen Energie zu ergründen. Das ehrgeizigste Projekt ist die Joint Dark Energy Mission (JDEM), die das US-Energieministerium und die Nasa gemeinsam vorgeschlagen haben. JDEM ist als Weltraumteleskop mit Zwei-Meter-Spiegel und großem Gesichtsfeld konzipiert; es soll Tausende von Ia-Supernovae entdecken und präzise messen. Ob JDEM allerdings im nächsten Jahrzehnt die Arbeit aufnehmen wird und ob das Hubble-Teleskop überhaupt bis dahin seine Supernova-Jagd fortsetzen kann, ist angesichts jüngster Budgeteinschränkungen ungewiss.

Das Rätsel der kosmischen Beschleunigung hängt eng mit dem künftigen Schicksal unseres Universums zusammen. Falls die Dunkle Energiedichte konstant ist oder mit der Zeit zunimmt, werden in rund hundert Milliarden Jahren auf Grund der extremen Rotverschiebung nur noch ein paar hundert Galaxien am Himmel zu sehen sein. Wenn die Dunkle Energiedichte hingegen abnimmt und die Materie wieder die Oberhand gewinnt, wird unser kosmischer Horizont wachsen und zusätzliche Bereiche des Universums enthüllen.

Sogar noch extremere – und tödliche – Zukunftsszenarien sind denkbar. Falls die Dunkle Energiedichte nicht fällt, sondern immerfort steigt, muss das Universum letztlich eine »Hyperbeschleunigung« erleiden, die nacheinander Galaxien, Sonnensysteme, Planeten und Atomkerne zerreißt. Das Universum könnte aber auch wieder kollabieren, wenn die Dunkle Energiedichte auf einen negativen Wert fällt. Erst wenn es uns gelingt, das geheimnisvolle Wesen der Dunklen Energie zu enträtseln, sind Prognosen über unsere kosmische Zukunft möglich. ◁







**Adam G. Riess** (links) ist Astronom am Space Telescope Science Institute, der Wissenschaftszentrale für das Hubble-Weltraumteleskop; er lehrt Physik und Astronomie an der Johns-Hopkins-Universität. 1998 war er Hauptautor des Artikels, in dem das High-z-Supernova-Team die Entdeckung der beschleunigten Expansion bekannt gab.

**Michael S. Turner** ist Professor an der Universität Chicago und derzeit stellvertretender Direktor für Mathematik und Physik bei der National Science Foundation. 1995 sagte er mit Lawrence M. Krauss die kosmische Beschleunigung voraus und prägte den Begriff Dunkle Energie.

Connecting quarks with the cosmos. Von: Committee on the Physics of the Universe, National Research Council. National Academies Press, 2003

The extravagant universe: exploding stars, dark energy and the accelerating cosmos. Von Robert P. Kirshner. Princeton University Press, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

TEIL III B

# Die geheimen Wege der Gravitation

Vielleicht wird die Beschleunigung der kosmischen Expansion nicht durch die hypothetische Dunkle Energie verursacht, sondern durch eine geringfügige Schwächung der Schwerkraft. Der Grund dafür könnte ein unaufhaltsames Versickern der Gravitation sein, weil sie aus unserer Welt teilweise in höhere Dimensionen strömt.

Von Georgi Dvali

Selten hat eine Entdeckung Kosmologen und Teilchenphysiker so verwirrt. Obwohl unser kosmologisches Standardmodell durch die jüngsten Beobachtungen bestätigt wurde, klafft jetzt darin eine gewaltige Lücke: Niemand weiß, warum die Expansion des Universums sich beschleunigt. Wenn man einen Stein senkrecht nach oben wirft, bremst ihn die Erdanziehung bekanntlich ab, statt ihn beschleunigt gen Himmel zu jagen. Genauso sollten ferne Galaxien, die seit dem Urknall durch die kosmische Expansion auseinander getrieben werden, einander anziehen und allmählich langsamer werden. Stattdessen entfernen sie sich immer schneller voneinander. Forscher machen in der Regel eine mysteriöse Dunkle Energie für diese Beschleunigung verantwortlich – aber hinter dem schönen Begriff steckt viel Spekulation und wenig Physik. Klar ist nur, dass die Gravitation sich in den größten kosmischen Maßstäben ziemlich sonderbar verhält: Sie wird zu einer abstoßenden Kraft.

Da die physikalischen Gesetze besagen, dass Gravitation durch Materie und Energie erzeugt wird, suggerieren die Formeln als Ursache einer rätselhaften Art von Schwerkraft eine ebenso rätselhafte Materie- oder Energieform. Das ist die Begründung für die Dunkle Energie. Aber vielleicht sollten die Gesetze selbst geändert werden. Die Physiker kennen dafür einen Präzedenzfall: Im Jahre 1915 musste das von Isaac Newton im 17. Jahrhundert formulierte Gravitationsgesetz, das verschiedene begriffliche und experimentelle Grenzen aufwies, der Allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins weichen. Doch auch die Relativitätstheorie stößt an ihre Grenzen, insbesondere wenn sie bei extrem kleinen Abständen der Quantenmechanik ins Gehege kommt. Wie die Relativitätstheorie Newtons Physik in einen viel größeren Zusammenhang stellte, so wird eine künftige Quantentheorie der Gravitation schließlich die Relativitätstheorie als Spezialfall enthalten.

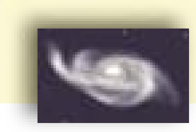
Für diese Quantengravitation haben die Physiker im Lauf der Jahre einige plausible Ansätze gefunden, vor allem die Stringtheorie. Wirkt die Gravitation über mikroskopische Entfernungen – beispielsweise im Zentrum eines Schwarzen Lochs, wo eine riesige Masse in ein subatomares Volumen gepackt ist –, kommen die bizarren Quanteneigenschaften der Materie ins Spiel. Die Stringtheorie beschreibt, wie sich das Gravitationsgesetz dabei ändert.

Die meisten Stringtheoretiker unterstellen, über größere Entfernungen seien Quanteneffekte vernachlässigbar. Doch die kosmologischen Entdeckungen der vergangenen Jahre haben an dieser scheinbaren Selbstverständlichkeit Zweifel geweckt. Vor vier Jahren überlegten meine Kollegen und ich, ob die Stringtheorie das Gravitationsgesetz vielleicht nicht nur für kleinste Distanzen abändert, sondern auch für größte Entfernungen. Diese Revision könnte sich auf die zusätzlichen sechs oder sieben Dimensionen berufen, welche die Stringtheorie den üblichen drei Raumdimensionen hinzufügt.

### Kosmologische Folgerungen aus der Stringtheorie

Früher meinten die Stringtheoretiker, die Extradimensionen seien viel zu klein, als dass wir sie wahrnehmen oder als dass Teilchen sich darin bewegen könnten. Aber wie neuerdings gezeigt wurde, können einige oder alle neuen Dimensionen durchaus unendlich ausgedehnt sein. Sie bleiben demnach nicht wegen ihrer Winzigkeit verborgen, sondern weil die Teilchen, aus denen unsereins besteht, in drei Dimensionen gefangen sind. Das einzige Teilchen, das dieser Beschränkung entkommt, ist das Graviton – das Quantenteilchen, das die Schwerkraft vermittelt –, und infolgedessen ändert sich das Gravitationsgesetz.

Als Astronomen die kosmische Beschleunigung entdeckten, vermuteten sie zunächst als Ursache die so genannte kosmologische Konstante. Diese von





DAVID EMMITE PHOTOGRAPHY

Wäre unser All in einen höherdimensionalen Raum eingebettet – wie diese »Ebene« in die gewöhnlichen drei Dimensionen –, könnten einige Gravitationsquanten in höhere Dimensionen entweichen. Dies würde die Schwerkraft geringfügig schwächen.

Einstein eingeführte und dann wieder verworfene Konstante steht für eine dem Raum selbst innewohnende Energie. Selbst ein völlig leeres Volumen birgt demnach eine Energie, die rund $10^{-26}$ Kilogramm pro Kubikmeter entspricht. Obwohl die kosmologische Konstante sich mit allen bislang vorliegenden Daten verträgt, finden viele Physiker sie unbefriedigend. Das Problem ist ihre unerklärliche Winzigkeit. Sie ist so klein, dass sie sich auf die kosmische Entwicklung von Anfang an kaum jemals ausgewirkt haben kann. Sie ist sogar noch viel kleiner als die energetische Größenordnung der physikalischen Prozesse, aus denen sie hervorgegangen sein soll (siehe den vorhergehenden Artikel).

Um dieses Problem zu umgehen, haben einige Physiker vorgeschlagen, die Beschleunigung werde nicht durch den Raum selbst verursacht, sondern durch ein Energiefeld, das den gesamten Raum erfüllt wie feiner Nebel. Die potenzielle Energie räumlich gleichförmiger Felder kann sehr ähnlich wirken wie eine kosmologische Konstante. Von einem derartigen Feld namens Inflaton wird angenommen, dass es im frühen Universum eine Phase explosiv beschleunigter Expansion, die kosmische Inflation, angetrieben hat. Vielleicht gibt es ein anderes Feld dieser Art, welches das Weltall gegenwärtig in eine weitere, allerdings viel gemächlichere Inflationsphase treibt.

Dieses zweite Feld heißt Quintessenz. Wie die kosmologische Konstante muss es einen ungeheuer kleinen Wert haben – aber die Befürworter argumentieren, eine dynamische Größe könne eher einen solch extremen Wert annehmen als eine statische Konstante (siehe »Die Quintessenz des Universums« von Jeremiah P. Ostriker und Paul J. Steinhardt, Spektrum der Wissenschaft 3/2001, S. 32).

Sowohl kosmologische Konstante als auch Quintessenz sind Spielarten der Dunklen Energie. Bislang fehlt für beide eine zwingende Erklärung, und deshalb denken einige Physiker ernsthaft über höherdimensionale Theorien nach. Der Reiz zusätzlicher Dimensionen besteht darin, dass sie das Verhalten der Gravitation automatisch verändern. Gemäß den Theorien Newtons und Einsteins sinkt die Stärke der Schwerkraft mit dem Quadrat der Entfernung. Dies hat einen einfachen geometrischen Grund: Nach einem von dem deutschen Mathematiker Carl Friedrich Gauß im 19. Jahrhundert formulierten Prinzip wird die Stärke einer Kraft durch die Dichte der Kraftlinien bestimmt, und mit wachsender Entfernung vom Kraftzentrum verteilen sich diese Linien über ein immer größeres Grenzgebiet.

### Ein neues Schwerkraftgesetz

Im dreidimensionalen Raum ist diese Grenze eine zweidimensionale Fläche – und deren Größe wächst mit dem Quadrat des Abstands vom Kraftzentrum. Doch wenn der Raum vierdimensional wäre, hätte er eine dreidimensionale Grenze – ein Volumen, dessen Größe mit der dritten Potenz des Abstands wächst. In diesem Fall würde die Dichte der Kraftlinien mit der dritten Potenz der Entfernung abnehmen. Die Gravitation wäre dann schwächer als in einer dreidimensionalen Welt. In kosmologischem Maßstab kann diese Schwächung der Gravitation, wie wir noch sehen werden, tatsächlich zu kosmischer Beschleunigung führen.

Angenommen, die Gravitation vermag wirklich in den zusätzlichen Raum auszuweichen – warum haben wir noch nichts davon bemerkt? Warum beschreibt das dreidimensionale Standardgesetz so präzise die Bewegung von Fußbällen, Raketen und Planeten? Die herkömmliche Antwort der Stringtheorie lautet, die zusätzlichen Dimensionen seien kompakt, das heißt von endlicher Ausdehnung und zu winzigen Kreisen zusammengerollt. Zunächst galt als Größenordnung dieser Kreise die so genann- ▷

## IN KÜRZE

▶ Die meisten Astronomen führen die **beschleunigte Expansion** des Universums auf eine unbekannte Dunkle Energie zurück. Eine andere Erklärung besagt, dass die Standardgesetze der Physik in den größten Maßstäben nicht mehr gelten.

▶ Ein abgeändertes Gravitationsgesetz geht aus der **Stringtheorie** hervor, die versucht, die Naturkräfte in einem einheitlichen Modell zusammenzufassen. Die Stringtheorie gilt in der Regel als eine Theorie des Mikrokosmos, aber sie kann auch makroskopische Konsequenzen haben.

▶ Insbesondere postuliert die Theorie **zusätzliche Dimensionen**, in welche nur die Gravitation zu entweichen vermag, nicht aber die gewöhnliche Materie. Dieser Gravitationsschwund würde das Kontinuum der Raumzeit verbiegen und die kosmische Expansion beschleunigen. Er könnte sogar eine winzige, aber beobachtbare Wirkung auf die Bewegung der Planeten ausüben.

## Wie schnell dehnt sich der Weltraum aus?

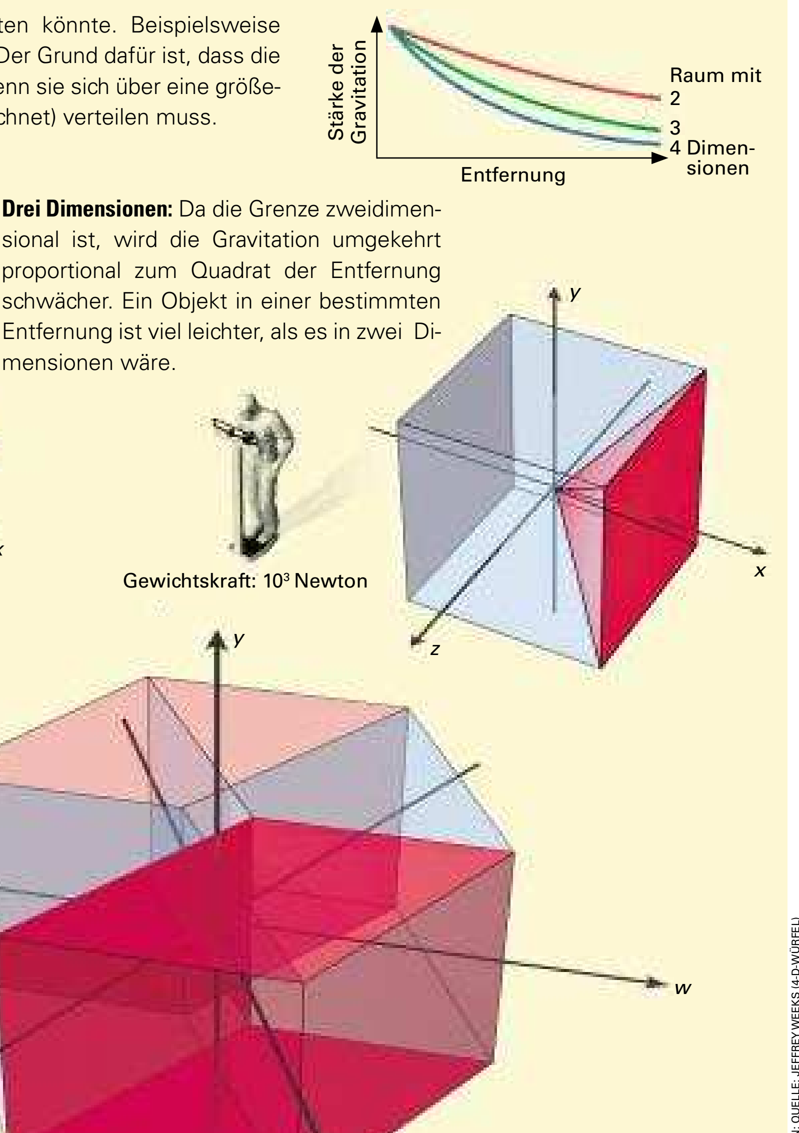
**Das Gravitationsgesetz ist flexibler,** als man vermuten könnte. Beispielsweise hängt es von der Anzahl der Raumdimensionen ab. Der Grund dafür ist, dass die Schwerkraft mit der Entfernung stärker abnimmt, wenn sie sich über eine größere Grenze (in den unteren Diagrammen rot eingezeichnet) verteilen muss.

**Zwei Dimensionen:** Die Grenze ist eine eindimensionale Linie und wächst proportional mit der Entfernung. Darum sinkt die Stärke der Schwerkraft umgekehrt proportional zur Entfernung.

**Drei Dimensionen:** Da die Grenze zweidimensional ist, wird die Gravitation umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung schwächer. Ein Objekt in einer bestimmten Entfernung ist viel leichter, als es in zwei Dimensionen wäre.

**Vier Dimensionen:** Diese Situation ist kaum zu veranschaulichen, aber auch hier gelten dieselben Regeln. Die Grenze ist dreidimensional, darum nimmt die Gravitation umgekehrt proportional zur dritten Potenz der Entfernung ab.

Ein Objekt ist bei gleicher Entfernung wesentlich leichter als in drei Dimensionen.




Gewichtskraft eines »Flachwesens« mit hundert Kilogramm Masse auf der Erdoberfläche: $10^{45}$ Newton

Gewichtskraft: $10^{3}$ Newton

Gewichtskraft: $10^{-39}$ Newton

BRYAN CHRISTIE DESIGN; QUELLE: JEFFREY WEEKS (4-D-WÜRFEL)

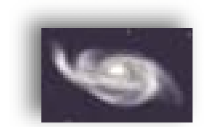
te Planck-Länge mit ungefähr $10^{-35}$ Metern, aber nach neuen theoretischen und experimentellen Forschungen könnten die Kreise bis zu 0,2 Millimeter groß sein (siehe »Die unsichtbaren Dimensionen des Universums« von Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos und Georgi Dvali, Spektrum der Wissenschaft 10/2000, S. 44). Wenn die Dimensionen eingerollt sind, beeinflussen sie die Wirkung der Gravitation allerdings nur über Distanzen, die nicht größer sind als der Radius der kompakten Dimensionen. Für größere Entfernungen gilt weiterhin das Standardgesetz der Gravitation.

Die Idee der kompakten Dimensionen hat jedoch ihre Schwierigkeiten. Man kann sich beispielsweise fragen, warum einige Dimensionen – die zusätzlichen – eng verknotet sind, während andere – die bekannten – unendlich weit reichen.

### Teilchen in Gefangenschaft

Unter dem Einfluss der Materie und Energie des Universums sollten sich die eingerollten Dimensionen entrollen, wenn sie nicht durch etwas stabilisiert werden. Eine Möglichkeit wäre, dass von der Stringtheorie vorhergesagte magnetfeldähnliche Kräfte die Dimensionen am Schrumpfen oder Expandieren hindern. Eine andere Lösung tauchte 1999 auf: Vielleicht sind sämtliche Dimensionen, sogar die zusätzlichen, von unendlicher Ausdehnung. Das beobachtbare Universum ist demnach eine dreidimensionale Membran in einer höherdimensionalen Welt. Die gewöhnliche Materie ist in dieser »Bran« – ein von Membran hergeleitetes Kunstwort – ausbruchsicher eingesperrt, aber einige Kräfte, insbesondere die Gravitation, können entkommen.

Die Gravitation hat diese spezielle Fähigkeit, weil sie sich von anderen Kräf-



## Drei Arten, eine zusätzliche Dimension zu schaffen

**Schon Albert Einstein** und andere Wissenschaftler seiner Zeit – insbesondere Theodor Kaluza und Oskar Klein – spielten mit dem Gedanken, der Raum könne verborgene Dimensionen enthalten. Diese Hypothese lebt in der Stringtheorie weiter.

Stellen wir uns unser dreidimensionales Universum der Einfachheit halber als ein flaches Gitter vor. Durch jeden einzelnen Gitterpunkt läuft eine Linie, die eine zusätzliche Dimension symbolisiert.

**Herkömmliche Stringtheorie:** Bis vor kurzem nahmen die Stringtheoretiker an, die zusätzlichen Dimensionen seien endlich groß – kleine Kreise von subatomarem Ausmaß. Ein winziges Wesen, das sich in dieser Dimension bewegt, kehrt unweigerlich zum Ausgangspunkt zurück.

**Modell mit unendlichem Volumen:** Der Autor und seine Mitarbeiter nehmen an, dass die zusätzlichen Dimensionen unendlich groß und nicht gekrümmt sind – genau so wie unsere gewohnten drei Dimensionen.



**Randall-Sundrum-Modell:** Kürzlich haben Stringtheoretiker zusätzliche Dimensionen vorgeschlagen, die unendlich groß, aber so stark gekrümmt sind, dass sich ihr Volumen um unser Universum herum konzentriert.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

ten fundamental unterscheidet. Nach der Quantenfeldtheorie wird die Gravitation durch ein eigenes Teilchen, das Graviton, vermittelt. Die Gravitationsanziehung entsteht durch den Austausch von Gravitonen zwischen zwei Körpern – ähnlich wie die elektromagnetische Kraft aus dem Fluss von Photonen zwischen geladenen Teilchen resultiert.

Bei statischer Gravitation sind die Gravitonen »virtuell«: Obwohl sich ihre Wirkung messen lässt, können sie nicht als unabhängige Teilchen beobachtet werden. Die Sonne hält die Erde auf der Umlaufbahn, indem sie virtuelle Gravitonen aussendet, die unser Heimatplanet absorbiert. »Reale« – direkt beobachtbare – Gravitonen entsprechen den Gravitationswellen, die unter bestimmten Bedingungen emittiert werden (siehe »Jagd auf Gravitationswellen« von Georg Wolschin, Spektrum der Wissenschaft 12/2000, S. 48).

Gemäß der Stringtheorie sind alle Teilchen, so auch die Gravitonen, letztlich Vibrationen winziger Fäden (englisch *strings*). Doch während Elektronen, Protonen und Photonen Schwingungen von Strings mit offenen Enden – wie Geigensaiten – sind, entspricht das Graviton der Oszillation einer geschlossenen Schleife, ähnlich dem Vibrieren eines Gummirings.

### Die Freiheit geschlossener Strings

Wie Joseph Polchinski vom Kavli-Institut für Theoretische Physik in Santa Barbara gezeigt hat, dürfen die Enden offener Strings nicht lose umherflattern, sondern müssen an eine Bran gebunden sein. Würde man versuchen, einen offenen String aus einer Bran herauszuziehen, so würde er wie ein elastisches Band gedehnt, bliebe aber an der Bran haften. Hingegen können geschlossene Strings – ▷

▷ wie die Gravitonen – nirgends hängen bleiben. Ihnen steht der gesamte zehndimensionale Raum zur Verfügung. Allerdings benehmen sich selbst Gravitonen nicht absolut zügellos – sonst würde das Standardgesetz der Gravitation spektakulär versagen.

Die Schöpfer der Hypothese unendlicher Extradimensionen, Lisa Randall von der Harvard- und Raman Sundrum von der Johns-Hopkins-Universität, vermuten deshalb, dass die zusätzlichen Dimensionen im Gegensatz zu unseren drei vertrauten sehr stark gekrümmt sind. Dadurch entstünde ein Tal mit steilen Wänden, die für die Gravitonen nur schwer zu überwinden wären.

Der Trick dabei ist: Die zusätzlichen Dimensionen sind so stark gekrümmt, dass ihr Volumen praktisch endlich bleibt, obwohl sie sich unendlich weit erstrecken. Wie kann ein unendlicher Raum ein endliches Volumen haben? Stellen wir uns vor, wir würden in ein bodenloses, aber sich nach unten stark verjüngendes Martiniglas Gin schütten. Um das Glas aufzufüllen, würde eine endliche Menge Gin genügen, denn wegen der Form des Glases konzentriert sich sein Volumen zum oberen Rand hin. Ganz ähnlich wird im Randall-Sundrum-Szenario argumentiert. Das Volumen des zusätzlichen Raumes konzentriert sich in der Nähe der Bran. Folglich ist ein Graviton gezwungen, die meiste Zeit in nächster Nähe der Bran zu verbringen. Die Wahrscheinlichkeit, das Graviton nachzuweisen, fallt mit zunehmender Entfernung rapide ab. In der Sprache der Quantentheorie hat die Wellenfunktion des Gravitons an der Bran einen Peak; man sagt, die Gravitation ist lokalisiert.

### Beschleunigte Expansion ohne Dunkle Energie

Obwohl das Randall-Sundrum-Szenario sich konzeptionell von der Idee kompakter Dimensionen unterscheidet, kommt praktisch dasselbe heraus. Beide Modelle modifizieren das Gravitationsgesetz für kurze Abstände, aber nicht für große Distanzen. Deshalb vermag keines von beiden das Problem der kosmischen Beschleunigung zu lösen.

Erst ein dritter Ansatz sagt den Zusammenbruch des gängigen Gravitationsgesetzes in kosmologischen Größenordnungen voraus und erklärt die Beschleunigung, ohne sich auf die Dunkle Energie berufen zu müssen. Im Jahr 2000 postulierten Gregory Gabadadze, Massimo Porrati – beide derzeit an der New-York-Universität – und ich, dass die zusätzlichen Dimensionen sich genauso verhalten wie die drei gewöhnlichen. Sie sind also weder kompakt noch stark gekrümmt.

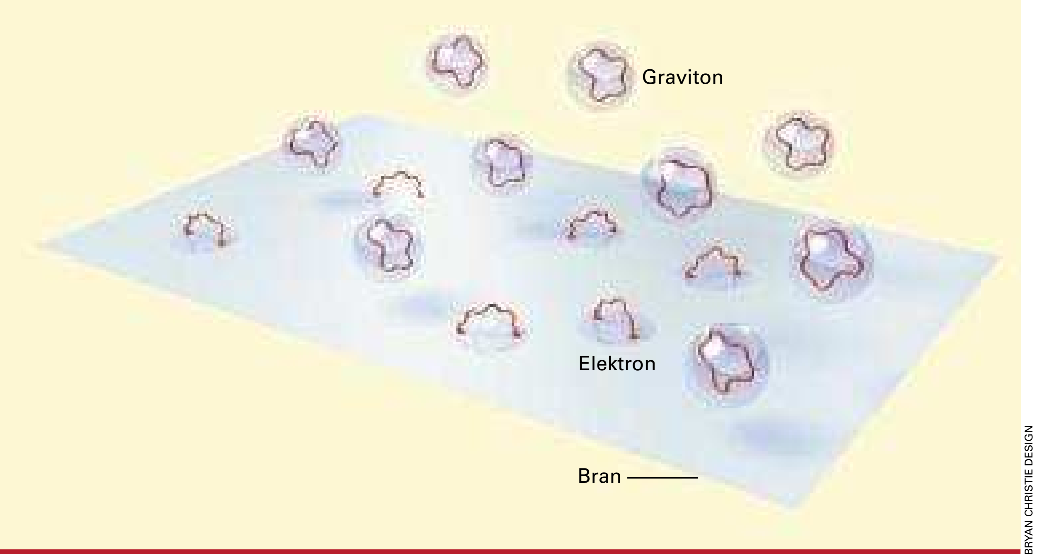
Selbst dann sind die Gravitonen nicht völlig frei. Nachdem sie von Sternen oder anderen auf der Bran lokalisierten Objekten emittiert wurden, können sie nur dann in die Extradimensionen entweichen, wenn sie eine bestimmte kritische Distanz zurückgelegt haben. Die Gravitonen verhalten sich wie Schall in einer dünnen Blechplatte. Ein Hammerschlag auf das Blech erzeugt eine Schallwelle, die an der Oberfläche entlangläuft. Aber die Schallausbreitung bleibt nicht streng zweidimensional: Ein Teil der Energie geht an die Umgebungsluft verloren. In unmittelbarer Nähe des Schlags ist dieser Energieverlust vernachlässigbar, aber in einigem Abstand macht er sich bemerkbar.

Dieser Schwund hat tief greifende Auswirkungen auf die Gravitationskraft zwischen Objekten, die mehr als die kritische Distanz voneinander entfernt sind. Virtuelle Gravitonen nutzen jeden möglichen Weg zwischen den Objekten, und ihr Entkommen eröffnet ihnen eine gewaltige Zahl an multidimensionalen Umwegen, durch die das Gravitationsgesetz verändert wird. Wenn reelle Gravitonen entweichen, gehen sie einfach für immer verloren, und für uns, die wir auf der Bran festsitzen, sieht es aus, als hätten sie sich in Luft aufgelöst. Die zusätzlichen Dimensionen machen sich auch in sehr kleinen Größenordnungen bemerkbar, genau wie in den Kompakt- und Randall-Sundrum-Szenarien. Nur über mittlere Entfernungen – größer als die Länge der Strings, aber kleiner als die Schwund-Distanz – sind die Gravitonen dreidimensional und gehorchen dem üblichen Gravitationsgesetz.

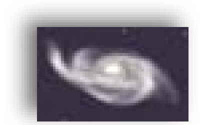
Der Schlüssel zu diesem Szenario ist die Bran selbst. Sie ist ein eigenständiges materielles Objekt, und die Gravitation breitet sich durch sie anders aus als durch den umgebenden Raum. Der Grund ist, dass gewöhnliche Teilchen wie Elektronen und Protonen ausschließlich auf der Bran existieren können. Selbst eine scheinbar leere Bran wimmelt von virtuellen Elektronen, Protonen und anderen Teilchen, die unentwegt durch Quantenfluktuationen entstehen und vergehen. Diese Teilchen er-

## Das Universum als Membran

**Leider werden Menschen** die zusätzlichen Dimensionen, selbst wenn sie existieren, niemals erkunden können. Die Stringtheorie interpretiert die Teilchen unseres Körpers – Elektronen, Protonen, Neutronen – als Schwingungsmuster von Strings mit offenen Enden. Auf Grund ihrer Natur sind sie unentrinnbar an die Membran gefesselt, die unser Universum darstellt – die so genannte Bran. Nur die Gravitonen, die Quantenteilchen der Schwerkraft, entgehen dieser Fesselung, weil sie keine freien Enden haben, mit denen sie angebunden werden könnten.




BRYAN CHRISTIE DESIGN



## Die polarisierte Bran als Teilchenfessel

**Sogar die Gravitonen** können sich nicht völlig ungehindert in den zusätzlichen Dimensionen herumtreiben. Unser dreidimensionales Universum, die Bran (hier als flaches Blatt dargestellt), ist von virtuellen Teilchen erfüllt, die kurz auftauchen und gleich wieder verschwinden. Um ihre Wirkung auf die Gravitonen modellhaft darzustellen, kann man sie sich als gleichzeitig auftretende Paare vorstellen.

Ein Partnerteilchen trägt positive Energie (blau), das andere negative (rot). Solche Paare können Gravitonen daran hindern, die Bran zu verlassen oder in sie einzudringen.

**Kein Graviton:** Wenn keine Gravitonen in der Nähe sind, bleiben die virtuellen Partikelpaare zufällig verteilt und erzeugen selbst keine resultierende Schwerkraft.

**Senkrechtes Graviton:** Bewegt sich ein Graviton in die Bran hinein oder aus ihr heraus, so richtet es die virtuellen Teilchenpaare aus – es polarisiert sie. Die polarisierten Teilchen erzeugen eine Schwerkraft, die der Bewegung des Gravitons entgegenwirkt.



**Paralleles Graviton:** Bewegt sich ein Graviton die Bran entlang, so übt es auf die virtuellen Teilchen keine Wirkung aus, denn die Kraft, die es ausübt, wirkt rechtwinklig zur Bran. Umgekehrt behindern auch die virtuellen Teilchen ihrerseits das Graviton nicht.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

zeugen Gravitation und reagieren auf sie. Der umgebende Raum ist hingegen wirklich leer. Dort können Gravitonen umherschwirren, aber sie reagieren mit nichts außer miteinander.

### Quantenfluktuationen in der Bran

Die Bran ähnelt einem dielektrischen Material wie beispielsweise Kunststoff, Keramik oder reines Wasser. Ein solches Material enthält elektrisch geladene Teilchen und reagiert auf ein äußeres elektrisches Feld. Im Dielektrikum sind die geladenen Partikel zwar nicht frei beweglich wie in einem Leiter, aber sie können sich umordnen. Durch Anlegen eines äußeren Feldes wird das Material elektrisch polarisiert. In Wasser beispielsweise drehen sich die Moleküle so, dass ihr positives Ende – die beiden Wasserstoffatome – in eine Richtung zeigt und ihr negatives Ende – das Sauerstoffatom – in die entgegengesetzte. In Natriumchlorid driften die positiven Natrium- und die negativen Chlor-Ionen ein wenig auseinander. Die umgruppierten Ladungen erzeugen ihrerseits ein elektrisches Feld, welches dem äußeren Feld entgegenwirkt. Ein Dielektrikum kann auf diese Weise die Ausbreitung von Photonen beeinflussen, die nichts anderes sind als oszillierende elektrische und magnetische Felder. Wenn Photonen in ein Dielektri- ▷

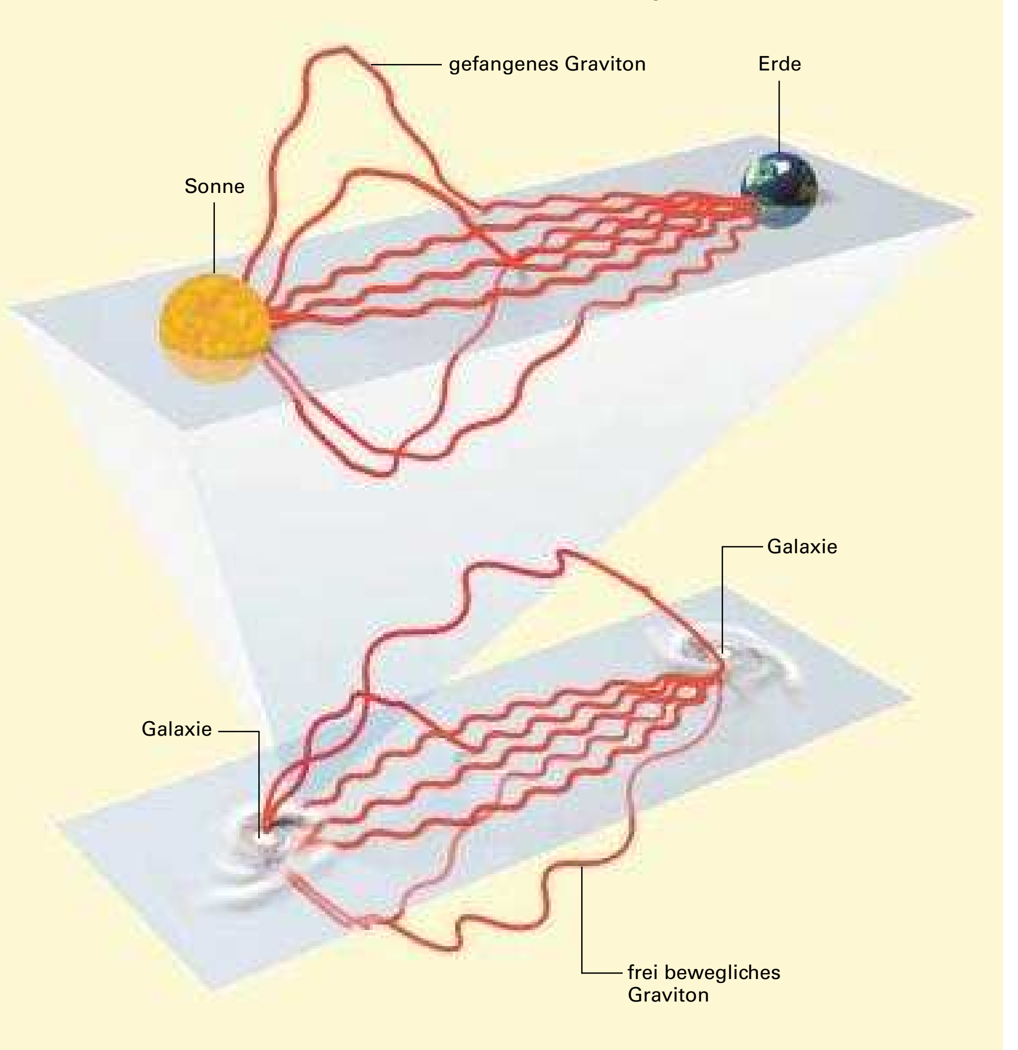
▷ kum eindringen, polarisieren sie es und werden dabei teilweise ausgelöscht.

Um diese Wirkung zu erzielen, muss die Wellenlänge des Photons in einem bestimmten Bereich liegen: Langwellige Photonen – mit kleinem Impuls – sind zu schwach, um das Dielektrikum zu polarisieren, und kurzwellige Photonen – mit großem Impuls – oszillieren so schnell, dass die geladenen Teilchen nicht reagieren können. Darum ist Wasser durchlässig für Radiowellen mit großen Wellenlängen sowie für sichtbares Licht mit kleinen Wellenlängen, aber undurchlässig für die mittleren Wellenlängen. Diesen Effekt nutzen Mikrowellenherde.

## Gravitationskräfte nah und fern

**Die Teilchen in unserem Universum** neigen dazu, die Gravitonen am Betreten und Verlassen der Bran zu hindern – aber nur, sofern die Gravitonen genügend Impuls haben, um eine Reaktion zu provozieren. Gravitonen mit kleinem Impuls – und großer Wellenlänge – können die Bran nach Belieben verlassen oder in sie eindringen.

**Indem die Sonne virtuelle Gravitonen emittiert,** übt sie Schwerkraft auf die Erde aus. Diese Gravitonen haben eine so kurze Wellenlänge – und so großen Impuls –, dass sie am dauerhaften Verlassen der Bran gehindert werden. Sie verhalten sich praktisch, als existierten die zusätzlichen Dimensionen gar nicht.




**Zwei ferne Galaxien emittieren langwellige Gravitonen** mit kleinem Impuls. Diese Gravitonen werden nicht gehindert, in die zusätzlichen Dimensionen zu entkommen. Das Gravitationsgesetz ändert sich: Die Kraft zwischen den Galaxien wird schwächer.

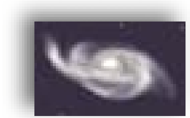
BRYAN CHRISTIE DESIGN

In ähnlicher Weise verwandeln Quantenfluktuationen die Bran in das Schwerkraft-Äquivalent eines Dielektrikums. Die Bran verhält sich, als wäre sie mit virtuellen Teilchen positiver und negativer Energie bevölkert. Durch Anlegen eines äußeren Gravitationsfeldes wird die Bran gravitativ polarisiert: Teilchen positiver Energie und Teilchen negativer Energie driften ein wenig auseinander. Ein Graviton, das ein oszillierendes Gravitationsfeld verkörpert, vermag die Bran zu polarisieren und wird ausgelöscht, falls seine Wellenlänge im richtigen Bereich liegt. Nach unseren Berechnungen liegt diese Spanne zwischen 0,1 Millimetern – oder noch weniger, je nach Anzahl der zusätzlichen Dimensionen – und ungefähr zehn Milliarden Lichtjahren.

### Subtile Effekte der Gravitonenphysik

Dieser Auslöschungseffekt erfasst nur Gravitonen, die sich in die Bran hinein- oder aus ihr herausbewegen. Gravitonen sind wie Photonen Transversalwellen: Sie schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Ein Graviton, das in die Bran eintritt oder sie verlässt, sucht die Teilchen entlang der Bran zu verschieben. Weil die Teilchen in dieser Richtung beweglich sind, können die Gravitonen die Bran polarisieren und werden im Gegenzug vernichtet. Hingegen versuchen Gravitonen, die sich längs der Bran bewegen, Teilchen aus der Bran herauszustoßen – in eine Richtung, die den Teilchen nicht freisteht. Darum polarisieren diese Gravitonen die Bran nicht; sie bewegen sich, ohne auf Widerstand zu stoßen. In der Praxis liegen die meisten Gravitonen zwischen den beiden Extremen. Sie flitzen unter schiefem Winkel zur Bran durch den Raum und können Milliarden von Lichtjahren zurücklegen, bevor sie ausgelöscht werden.

Auf diese Weise schirmt sich die Bran von den zusätzlichen Dimensionen ab. Versucht ein Graviton mittlerer Wellenlänge der Bran zu entkommen oder in sie einzudringen, so ordnen sich die Teilchen in der Bran um und blockieren das Graviton. Die Gravitonen können sich nur entlang der Bran bewegen, sodass das übliche Schwerkraftgesetz gilt, wonach die Kraft mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Langwellige Gravitonen können hingegen frei durch die Extradimensionen wandern. Diese Gravitonen fallen bei kurzen Entfernungen nicht ins Gewicht, dominieren aber bei



Distanzen, die mit ihrer Wellenlänge vergleichbar sind. Dadurch wird die Isolierung der Bran von den Extradimensionen unterminiert. Das Gravitationsgesetz zeigt dann eine umgekehrt proportionale Abhängigkeit zur dritten Potenz, sofern nur eine der zusätzlichen Dimensionen unendlich ist, zur vierten Potenz, falls zwei unendlich sind, oder sogar einen noch steileren Abfall mit der Entfernung. Jedenfalls wird die Gravitation geschwächt.

Cédric Deffayet, der nun am Pariser Institut für Astrophysik tätig ist, Gabadadze und ich haben herausgefunden, dass die zusätzlichen Dimensionen nicht nur die Schwerkraft schwächen, sondern auch die kosmische Expansion beschleunigen, ohne dass dafür die Existenz der Dunklen Energie erforderlich wäre. Man könnte meinen, die Abschwächung der Gravitationskraft würde deren Bremswirkung auf die Expansion so sehr verringern, dass die Abbremsung letztlich negativ wird – das heißt, in Beschleunigung umschlägt. Aber der Effekt ist subtiler. Er hat damit zu tun, wie der Gravitonenschwund die Allgemeine Relativitätstheorie verändert. Nach der Einstein'schen Theorie ist die Schwerkraft eine direkte Folge der Raumzeit-Krümmung, die wiederum von der Dichte der vorhandenen Materie und Energie abhängt. Die Sonne zieht die Erde an, indem sie die umgebende Raumzeit verbiegt. Ohne Materie und Energie gibt es keine Krümmung und also auch keine Gravitation. Doch in der höherdimensionalen Theorie ändert sich der Zusammenhang zwischen Krümmung und Dichte. Die zusätzlichen Dimensionen führen zu einem Korrekturterm in den Gleichungen, der dafür sorgt, dass die Krümmung einer leeren Bran nicht null ist. Der Gravitonenschwund setzt die leere Bran quasi unter Spannung und erzeugt eine irreduzible Krümmung, die nicht von der Materie- und Energiedichte in der Bran abhängt.

## Beschleunigung durch Bran-Biegen

Mit der Zeit werden Materie und Energie verdünnt, die durch sie verursachte Krümmung nimmt ab und die irreduzible Krümmung gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die Krümmung des Universums nähert sich einem konstanten Wert. Das gleicht aufs Haar dem Effekt einer Substanz, die das Universum gleichmäßig erfüllt und im Laufe der Zeit nicht verdünnt wird. Diese Substanz ist nichts anderes als die kosmologische Konstante. Somit wirkt die irreduzible Krümmung der Bran wie eine kosmologische Konstante, welche die kosmische Expansion beschleunigt.

Unsere Theorie ist nicht die einzige, die den Zusammenbruch des gängigen Gravitationsgesetzes bei großen Entfernungen postuliert. Im Jahr 2002 haben Thibault Damour vom Institut Hautes Etudes Scientifiques in Frankreich, Antonios Papazoglou von der Universität Bonn sowie Ian Kogan von der Universität Oxford eine zusätzliche Variante von Gravitonen vorgeschlagen, die im Unterschied zu normalen Schwerkraftteilchen eine kleine Masse besitzen sollen. Wie Physiker längst wissen, gehorcht die Schwerkraft, falls die Gravitonen Masse haben, nicht dem invers-quadratischen Gesetz. Massehaltige Gravitonen sind instabil und zerfallen allmählich – mit derselben Wirkung wie beim Gravitonenschwund: Über große Entfernungen verschwinden sie, die Gravitation wird schwächer und die kosmische Expansion beschleunigt sich.

Sean Carroll, Vikram Duvvuri und Michael Turner von der Universität Chicago sowie Mark Trodden von der Syracuse-Universität haben Einsteins Theorie durch Hinzufügen winziger Terme modifiziert, die umgekehrt proportional zur Raumzeit-Krümmung sind. Solche Terme wären im frühen Universum vernachlässigbar, würden aber später die Expansion beschleunigen. Auch andere Forscher haben Modifikationen des Gravitationsgesetzes vorgeschlagen, aber ihre Ansätze kommen nicht ohne Dunkle Energie als Beschleunigungsursache aus.

Über all diese Modelle werden astronomische Beobachtungen das entscheidende Wort sprechen. Einen direkten Prüfstein könnten präzisere Supernova-Durchmusterungen liefern. Der Übergang von kosmischer Verlangsamung zu Beschleunigung vollzieht sich bei Gravitonenschwund ganz anders als bei Szenarien mit Dunkler Energie.

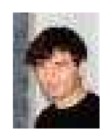
Einen anderen empirischen Test bietet die Planetenbewegung. Eine Gravitationswelle kann – genau wie eine gewöhnliche elektromagnetische Welle – eine bevorzugte Schwingungsrichtung haben. Die Allgemeine Relativität erlaubt nur zwei solche Richtungen, aber alternative Gravitationstheorien lassen mehrere zu. Diese zusätzlichen Möglichkeiten modifizieren die Gravitationskraft geringfügig und führen möglicherweise zu beobachtbaren Korrekturen der Planetenbewegung. Andrei Gruzinov und Matias Zaldarriaga von der New-York-Universität haben zusammen mit mir berechnet, dass der Gravitonenschwund eine langsame Präzession der Mondbahn verursachen müsste.

## Mondbahn als String-Test

Bei jedem Umlauf würde sich die größte Annäherung des Monds an die Erde um ungefähr ein billionstel Grad – oder um einen halben Millimeter – verschieben. Diese Verschiebung könnte sich bei Messungen der Mondentfernung bemerkbar machen; dabei werden Laserstrahlen an Spiegeln reflektiert, welche die Apollo-Astronauten auf dem Mond zurückgelassen haben. Derzeit sind diese Experimente auf einen Zentimeter genau, und Eric Adelberger von der Universität Washington schlägt vor, die Genauigkeit durch stärkere Laser um den Faktor zehn zu verbessern. Raumsonden könnten denselben Präzessionseffekt bei der Marsbahn aufspüren.

Schon die bloße Tatsache, dass Astronomen über Tests der Stringtheorie debattieren, ist aufregend. Jahrelang galt diese Theorie als Beschreibung des Allerkleinsten – mit so winzigen Effekten, dass kein Experiment sie jemals direkt beweisen oder widerlegen könnte. Doch nun schlägt die kosmische Beschleunigung eine Brücke zwischen dem Kleinsten und dem Allergrößten und öffnet eine unerwartete Hintertür in zusätzliche Dimensionen, die für uns ansonsten unsichtbar sind. ◁

**AUTOR UND LITERATURHINWEISE**



**Georgi Dvali** ist in der früheren Sowjetrepublik Georgien aufgewachsen und promovierte am Andronikashvili-Institut für Physik in Tbilisi. Nach Forschungsaufenthalten an der Universität Pisa, am Cern bei Genf und am Internationalen Zentrum für Theoretische Physik in Triest ging er an die Physikalische Fakultät der New-York-Universität.

Das elegante Universum: Superstrings, verborgene Dimensionen und die Suche nach der Weltformel. Von Brian Greene. Berliner Taschenbuch Verlag, 2002

The fabric of the cosmos: space, time, and the texture of reality. Von Brian Greene. Knopf, 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.




## Strom im Aquarium

Der Zitteraal sendet zur Orientierung ständig elektrische Stromstöße aus … Nachdem im Aquarium des Amsterdamer Zoologischen Gartens eigens ein Apparat zur Registrierung der Stromstöße konstruiert worden war, konnte eine solche Einrichtung jetzt erstmalig im Hause der 1000 Fische – Aquarium – Duisburger Tierpark auch für Deutschland gezeigt werden. Dieser Apparat macht die ausgesandten Stromstöße für das Publikum in einem Lautsprecher hörbar, und aufblitzende Glühlampen zeigen die elektrischen Ströme an … Die Geräusche und das Aufblitzen gehen oft so schnell hintereinander, daß man glaubt, Maschinengewehrgeknatter zu hören. *(Kosmos, 50. Jg., Heft 7, S. 355, Juli 1954)*



Zitteraal, auch Elektrischer Aal genannt (*Electrophorus electricus*)

## Tintenkiller

Ein niederländisches Unternehmen hat ein »negatives Schreibgerät« entwickelt … »Schreibt« man mit diesem »Füller« vorhandene Schriftzüge aus Tinte nach, … verschwinden diese. Alsbald nach dem Trocknen ist das Papier an der gleichen Stelle wieder beschreibbar … Das Gerät … ist ausschließlich zur Verbesserung von Schreibfehlern gedacht, … wo das Radieren mit dem Messer … nicht mehr möglich wäre. Die Gefahr … zur Urkundenfälschung besteht nicht, da die vorgenommene Verbesserung unter der Analysenquarzlampe erkennbar ist. *(Chemiker-Zeitung, 78. Jg., Nr. 13, S. 432, 5. Juli 1954)*

## Solarzelle erfunden!

Ende April dieses Jahres gaben die Bell Telephone Laboratories in Murray Hill, New Jersey (USA) bekannt, daß es einer dort arbeitenden Forschergruppe – G. L. Pearson, D. M. Chapin und C. S. Fuller – gelungen sei, eine »Sonnenbatterie« zu entwickeln, die Licht in Energie umwandelt … Sie besteht aus dünnen Siliziumstreifen höchster Reinheit … Da die hier vor sich gehende Energie-Umwandlung nichts verbraucht oder zerstört, ist die Lebensdauer einer solchen Sonnenbatterie unbegrenzt. *(Chemiker-Zeitung, 78. Jg., Nr. 13, S. 430, 5. Juli 1954)*

## Quecksilberdampflampe

Leitet man Gleichstrom durch die von Cooper Hewitt erfundene Quecksilberdampf-Bogenlampe, so verdampft das Quecksilber und ... erstrahlt in einem stetigen, bläulichweissen Lichte … An dem Lichtbogen ist eine grosse Leuchtkraft, Konstanz des Lichtes und der Reichtum an ultravioletten Strahlen sehr bemerkenswert. Wegen dieser Eigenschaften ist diese Lampe ganz besonders für … wissenschaftliche Arbeiten nützlich, zumal die Anpassung ihrer Form ... keine Schwierigkeiten bietet. *(Elektrochemische Zeitschrift, 11. Jg., Heft 4, S. 87, Juli 1904)*

## Made in Germany

Dem englischen Parlament liegt ein … Gesetzentwurf zur Abänderung der »Merchandise Marks Act, 1887« vor. Demnach soll § 16 dieses Gesetzes wie folgt abgeändert werden: Alle Waren fremder Herkunft dürfen nicht in das Vereinigte Königreich eingeführt werden, wenn nicht das Wort »Imported« deutlich und unverwischbar auf jeder Ware aufgestempelt ist … Es war schon vorausgesagt worden, daß dieses Gesetz, welches mit seinem Zwang zur Bezeichnung aller Waren deutscher Herkunft als »Made in Germany« sich augenscheinlich gegen den sieghaften Wettbewerb der deutschen Industrie mit der englischen auf dem Weltmarkt richtete, den Nimbus der unfehlbaren Güte englischer Waren zerstören würde. In der Tat haben sich die englischen Abnehmer überzeugt, daß Waren, deren Herkunft durch die Aufschrift »Made in Germany« … keineswegs immer »billig und schlecht« sind … So wurde … das Achtungszeichen »Made in Germany« zu einem Achtungszeichen, das den englischen Fabrikanten und Großhändlern manchen Kunden entzog. *(Annalen für Gewerbe und Bauwesen, Bd. 55, S. 39, Juli-Dezember 1904)*

## Limo in Flaschen

Es gibt Mischgetränke, die am angenehmsten schmecken und am bekömmlichsten sind, wenn dieselben unmittelbar nach stattgefundener Mischung genossen werden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen und stets eine aromatische Limonade zu sichern, hat Herr Apotheker Gindler eine Flasche erfunden, die es gestattet, Flüssigkeiten von einander getrennt, unterzubringen, sodaß sie erst im Gebrauchsfalle mit einander zur Vermischung gelangen ... Soll der Inhalt Verwendung finden, wird der obere Verschluß gelöst und die Schließkugel von ihrem Sitz zurückgedrückt, worauf Entleerung der Flasche erfolgen kann und eine Mischung des Fruchtsaftes mit dem kohlensauren Wasser. *(Zeitschrift für die gesamte Kohlensäure-Industrie, 10. Jg., Nr. 14, S. 484, 25. Juli 1904)*







Eine Kugel trennt den süßen Saft vom spritzigen Mineralwasser.

SINNESTÄUSCHUNGEN

# Sehen ist Glaubenssache

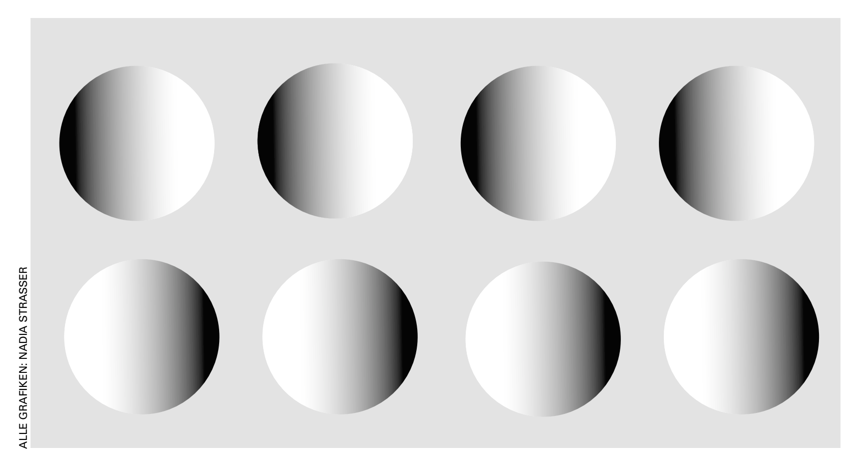
2-D oder 3-D, das ist hier die Frage: Testen Sie sich selbst und finden Sie heraus, was optische Täuschungen über das Gehirn mitteilen

Von Vilayanur S. Ramachandran und Diane Rogers-Ramachandran

Schon das sichtbare Bild an sich ist mehrdeutig: Betrachtet man einen Zwerg aus der Nähe oder einen Riesen aus der Entfernung, dann kann ihr Abbild auf der Netzhaut unter Umständen die gleiche Größe haben. Um solche Mehrdeutigkeiten aufzulösen, geht das Gehirn von bestimmten Annahmen aus. Anhand von Sinnestäuschungen lässt sich herausfinden, welche verborgenen »Regeln« unser Gehirn uns vorgibt. Wir werden das an einer bestimmten Form von Sinnestäuschungen illustrieren – solchen nämlich, die von Schattierungen hervorgerufen werden.

Die unten auf dieser Seite dargestellten Scheiben sind mehrdeutig: Die obere Reihe kann man als Erhebungen oder »Noppen« auffassen, welche von rechts beleuchtet werden, und die untere Reihe als »Dellen« – oder umgekehrt. Die Sehzentren im Gehirn gehen also von vornherein davon aus, dass eine einzige Lichtquelle das gesamte Bild beleuchtet – eine sinnvolle Einrichtung, bedenkt man, dass wir uns auf einem Planeten mit einer einzigen Sonne entwickelt haben. Indem man die – gedachte – Lichtquelle von rechts nach links verlagert, vertauschen Noppen und Dellen ihre Plätze.

**Die obere Reihe kann man sich als Erhebungen und die untere als Dellen vorstellen – oder anders herum; das hängt davon ab, ob sich die gedachte Lichtquelle rechts oder links des Bildes befindet.**

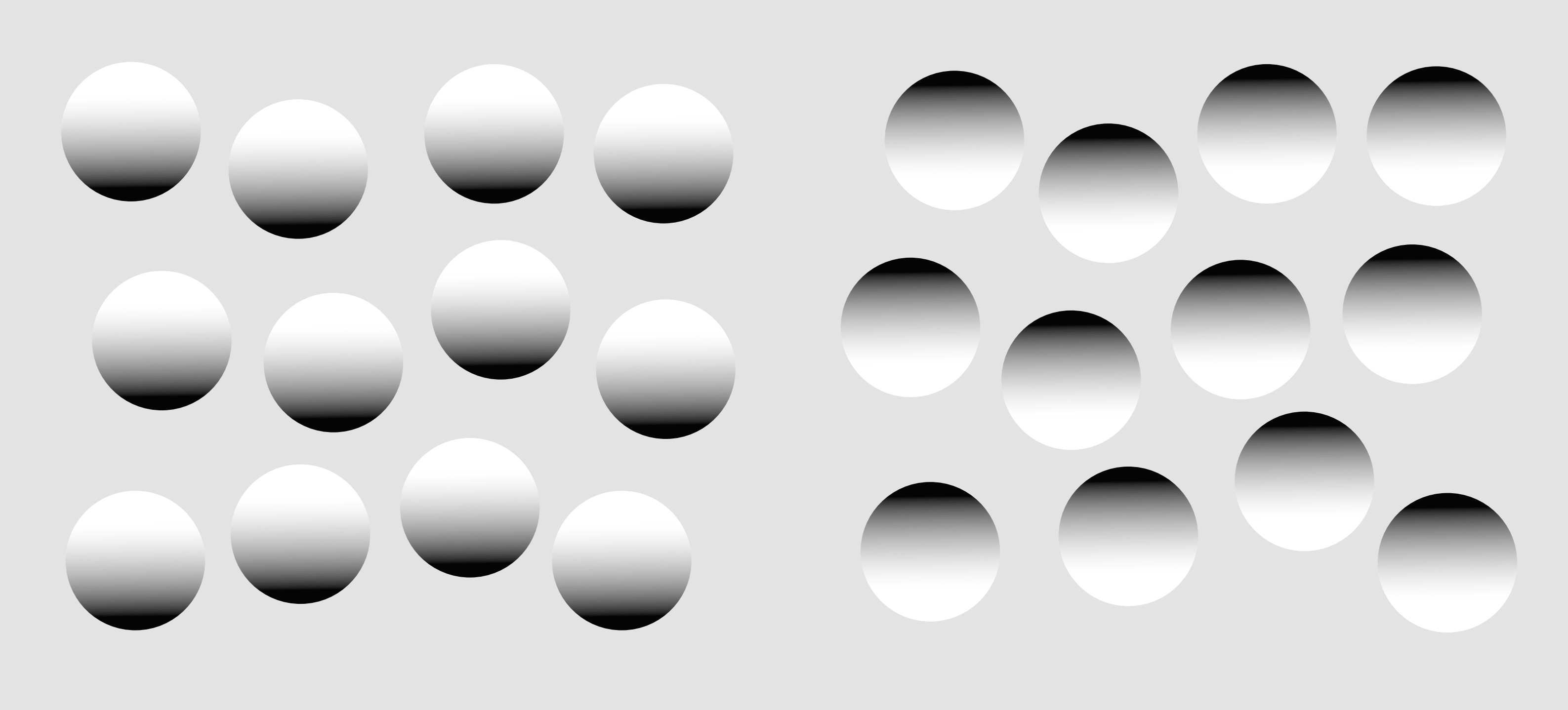


ALLE GRAFIKEN: NADIA STRASSER

## Als wäre die Sonne auf dem eigenen Kopf festgeklebt

Die Abbildung auf der rechten Seite vermittelt sogar einen noch zwingenderen Eindruck. Hier sehen die Scheiben mit heller Oberseite (linke Hälfte) immer wie Noppen aus – und jene mit heller Unterseite (rechte Hälfte) immer wie Dellen. Dies zeigt uns eine weitere »Regel« des visuellen Systems: Es erwartet, dass das Licht immer von oben kommt. Sie glauben es nicht? Drehen Sie die Seite um: Noppen und Dellen vertauschen augenblicklich die Plätze.

Erstaunlicherweise bleibt die Annahme des Gehirns, dass Licht immer von oben einfalle, auch dann gewahrt, wenn man Kopf steht. Stellen Sie die Heftseite aufrecht an eine Stuhllehne. Dann drehen Sie sich um und blicken gebückt durch Ihre Beine auf das Motiv. Wieder haben Noppen und Dellen ihre Plätze vertauscht – so als würde die



Links sind die Noppen und rechts die Dellen – klarer Fall. Auch für Sie? Unser Gehirn geht davon aus, dass Licht immer von oben scheint.

Sonne auf Ihrem Kopf festgeklebt sein und nun vom Boden heraufscheinen. Unser Gleichgewichtszentrum – das vestibuläre System – registriert anhand kleiner Steinchen im Ohr, den so genannten Otolithen, die Richtung der Schwerkraft. Es sendet Korrektursignale zu den Sehzentren im Gehirn, sodass die Welt weiterhin aufrecht erscheint, aber es korrigiert nicht die Lage der Sonne.

Dieses Experiment zeigt klar: Was uns als nahtlose Einheit erscheint, wird eigentlich von mehreren Modulen im Gehirn vermittelt, die Informationen parallel verarbeiten. Einige dieser Module haben Verbindungen mit dem vestibulären System – doch eben nicht jene Teilinstanz, die bestimmten Schattierungen bestimmte Formen zuordnet. Möglicherweise würde es zu viel »Rechenkapazität« beanspruchen, jedes Bild auf die richtige Platzierung in einem erdbezogenen Koordinatensystem zu korrigieren.

Unsere Vorfahren hielten ihre Köpfe im Allgemeinen aufrecht, weshalb das Gehirn mit der vereinfachenden Annahme auskam, Licht scheine immer von oben. Anders ausgedrückt: Unsere Vorfahren konnten trotz dieser Vereinfachung genügend Nachwuchs erfolgreich aufziehen; ihr Fortpflanzungserfolg war fachlich ausgedrückt hoch genug, sodass kein Selektionsdruck in Richtung einer vestibulären Korrektur entstand.

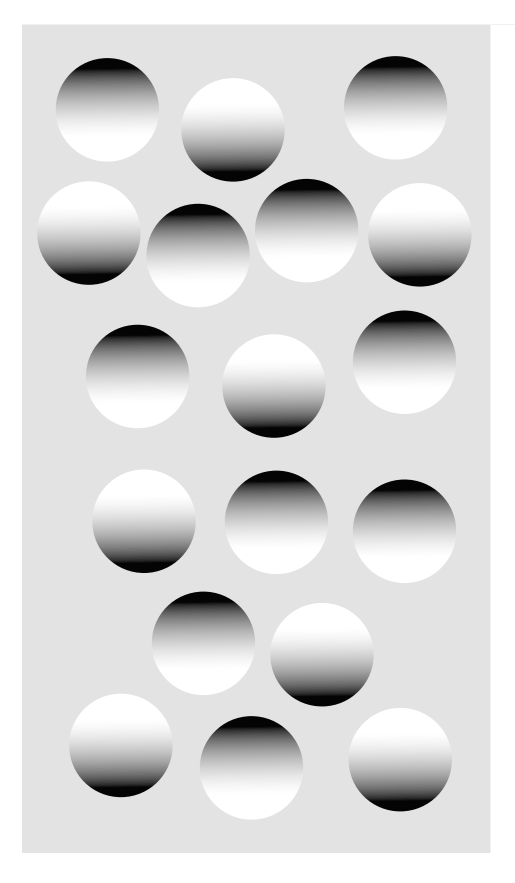
Werfen Sie nun einen Blick auf die linke Abbildung der folgenden Seite. Sie werden fast augenblicklich die »Eier« als Gruppe getrennt von den »Bechern« unterscheiden können. Wie Wissenschaftler schon vor Jahrzehnten entdeckten, gibt es bestimmte elementare Merkmale, die optisch förmlich ins Auge springen und während des Sehprozesses früh extrahiert werden. Farbe gehört dazu. Beispielsweise hebt sich eine verstreute Ansammlung roter Punkte inmitten vieler grüner praktisch sofort heraus – nicht aber eine Gruppe lächelnder Gesichter unter etlichen finsteren Mienen.

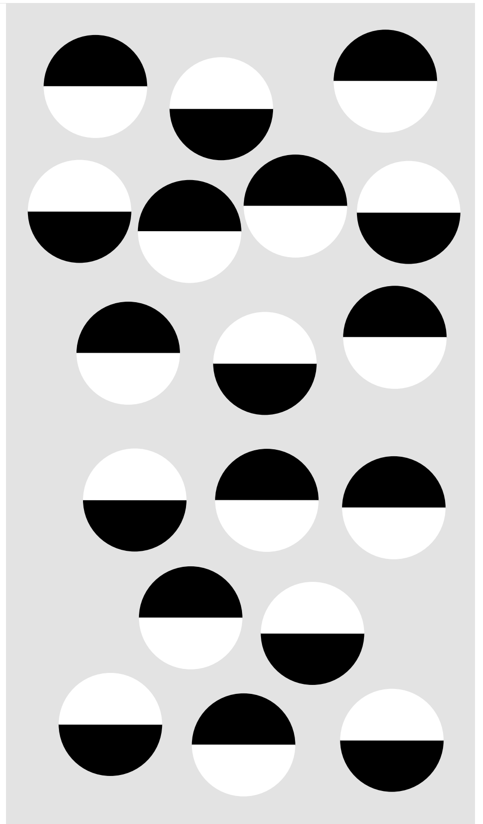
Im Sinne des Überlebens ist die Fähigkeit sinnvoll, Fragmente gleicher Farbe zu einer Gestalt zusammenzusetzen. Ein Löwe hinter einem Blättervorhang erscheint auf der Netzhaut lediglich als Splitterwerk gelber Farbflecke, doch das visuelle System fügt das Ganze zur Löwenform zusammen und gibt die Warnung aus: »Flieh!«. Wann aber sind schon Objekte aus lächelnden Gesichtern zusammengesetzt?

## Wahrgenommene Tiefe als wichtige Kenngröße

Der Umstand, dass man die Noppen in der Abbildung fast augenblicklich gruppieren kann, spricht dafür, dass Schattierungsinformationen – ähnlich wie Farbinformationen – während des Sehprozesses früh extrahiert werden (siehe auch Spektrum der Wissenschaft, 10/1988, S. 94). Dies wurde in den letzten Jahren experimentell bestätigt, und zwar durch Messung neuronaler Aktivitäten bei Affen sowie durch Hirnscans am Menschen. Be- ▷

**Schon beim flüchtigen Hinsehen sollten die Erhebungen ins Auge springen und sich klar von den Dellen abheben (linke Hälfte). Weder Erhebungen noch Vertiefungen sieht man auf der rechten Hälfte, obwohl die Kreisflächen die gleiche Helligkeitspolarität aufweisen wie in der Abbildung links daneben. Es ergibt sich kein räumlicher Eindruck.**





stimmte Zellen der Sehrinde springen an, wenn die Versuchspersonen Noppen sehen, andere Zellen dort tun dies hingegen nur bei Dellen.

Nichts dergleichen geschieht bei der Konstellation der Abbildung daneben (oben rechts). Hier besitzen die Kreisflächen die gleiche Helligkeitspolarität wie die Erhebungen und Vertiefungen daneben, aber man kann keine Gruppierung erkennen. Diese Tatsache zeigt, welch wichtige Kenngröße die wahrgenommene Tiefe ist.

## Schattierung als Tarnung vor Räubern

Die Prinzipien der Schattierung, die Wissenschaftler erst seit einiger Zeit erforschen, werden von der Evolution natürlich schon seit Jahrmillionen vorteilhaft genutzt. Gazellen haben weiße Bäuche und dunkle Rücken – diese Gegenschattierung neutralisiert den Effekt des Sonnenlichts von oben. Die Tiere springen weniger ins Auge, außerdem erscheinen sie aus der Sicht eines Raubtieres magerer und weniger appetitlich.

Auch manche Raupen zeigen Gegenschattierung, sodass sie auf den Blättern weniger auffallen, auf denen sie sich fressend aufhalten. Eine Raupenart verfügt über inverse Gegenschattierung – was scheinbar keinen Sinn machte, bis Forscher entdeckten, dass das Insekt gewöhnlich mit der Oberseite nach unten an Zweigen hängt. Bestimmte achtarmige Kraken können ihre Gegenschattierung sogar aktiv umkehren: Hängt man die Tiere mit den Armen nach oben auf, invertieren ihre vestibulär kontrollierten Pigmentzellen die Hell-Dunkel-Verteilung.

Der englische Naturforscher Charles Darwin (1809 – 1882) fand in den berühmten augenähnlichen Flecken auf dem Schwanz von Argusfasanen ein eindrucksvolles Beispiel dafür, wie die Natur Gebrauch von Schattierungen macht. Befinden sich die Schwanzfedern in horizontaler Lage, dann sind die Flecken in Links-rechts-Richtung schattiert. Während der Balz jedoch richtet der Vogel, der auch als Arguspfau bezeichnet wird, seinen Schwanz auf. Damit ändert sich die Richtung der Schattierung: In der aufrechten Schwanzposition sind die Flecken oben heller und unten dunkler, was zur Folge hat, dass sie sich wie glänzende Metallkugeln herauszuwölben scheinen – der Vogel hat sozusagen sein Geschmeide angelegt.

Ein paar einfache schattierte Kreisflächen können also enthüllen, welche Annahmen, welche versteckten Regeln, unserem visuellen System zu Grunde liegen – und sogar, welche Rolle diese Prinzipien in der Evolution der Formerkennung spielten. Dies zeigt uns, wie sehr uns optische Täuschungen dabei helfen können, das Wesen unserer Wahrnehmung zu verstehen.

AUTOREN UND LITERATURHINWEIS

**Vilayanur S. Ramachandran** und **Diane Rogers-Ramachandran** arbeiten gemeinsam am Zentrum für Gehirn und Kognition der Universität von Kalifornien in San Diego. Ihr Interesse gilt Aspekten der visuellen Wahrnehmung. Sie forschte an der Universität von North Carolina in Chapel Hill, bevor sie nach San Diego wechselte.

Neural activity in early visual cortex reflects behavioral experience and higher-order perceptual saliency. Von Tai Sing Lee et al. in: Nature Neuroscience, Bd. 5, Nr. 6, S. 589, Juni 2002

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

# Skalenfreie Netze

Komplexe Netze von Beziehungen der verschiedensten Art gehorchen gemeinsamen Organisationsprinzipien. Diese Erkenntnis ist auf vielen Gebieten von Nutzen: für die Entwicklung von Medikamenten ebenso wie für die Sicherheit des Internets.

Von Albert-László Barabási
und Eric Bonabeau

Vernetzte Strukturen sind allgegenwärtig. Die Nervenzellen des Gehirns sind durch Synapsen miteinander verbunden; jede Zelle ihrerseits enthält zahlreiche Stoffe, die verbunden sind in dem Sinne, dass sie miteinander reagieren. Innerhalb von Gesellschaften gibt es Beziehungen unter Menschen in Form von Freundschaften, Verwandschaften und beruflichen Bindungen. Oder die Elemente der vernetzten Struktur sind ganze Tier- und Pflanzenarten, deren – weniger freundschaftliche – Beziehung darin besteht, dass die eine die andere frisst. Weitere, technische Beispiele sind das Internet, Stromnetze und Transportsysteme. Selbst die Wörter der Sprache, in der wir Ihnen diese Gedanken übermitteln, stehen miteinander in syntaktischer Beziehung.

Wir wollen Sie in diesem Artikel einladen, alle derartigen Strukturen von einem sehr abstrakten Standpunkt aus zu betrachten. Menschen, Nervenzellen, Websites und so weiter sind nichts weiter als Knoten in einem gedachten Netz *(network)*, und die Beziehungen zwischen ihnen, so verschiedenartig sie im konkreten Fall sein mögen, sind einfach Fäden (»Kanten«) zwischen den Knoten. Damit ist die Fülle der jeweiligen Realität reduziert auf das, was die Mathematiker einen Graphen nennen. Unter dieser Betrachtungsweise treten zwischen den unterschiedlichsten Netzen überraschende Gemeinsamkeiten zu Tage.

Überraschend auch für die Fachleute. Denn trotz ihrer Allgegenwart und großen Bedeutung sind Struktur und Eigenschaften solcher Netze bislang kaum verstanden. Wie kann das Zusammenspiel einiger defekter Knoten in dem komplizierten biochemischen Netz einer Körperzelle zu Krebs führen? Wie kommt es zu der explosionsartigen Ausbreitung von Gerüchten, Epidemien und Computerviren in sozialen und Kommunikationssystemen? Wie kommt es, dass einige Netze selbst dann noch funktionieren, wenn die übergroße Mehrheit ihrer Knoten ausfällt?

Neuerdings gibt es erste Antworten. In den letzten Jahren entdeckten Wissenschaftler unterschiedlicher Disziplinen, dass viele Netze – vom World Wide Web bis hin zum Stoffwechselsystem einer Zelle – durch eine relativ geringe Zahl von sehr großen Knoten beherrscht werden, das heißt solchen, die mit besonders vielen anderen verbunden sind. (Die »Größe« eines Knotens ist die Anzahl der Verbindungen, die von ihm ausgehen.) Solche prominenten Knoten werden als »Naben« *(hubs)* bezeichnet, in Anspielung auf die vielen Speichen, die von einer Fahrradnabe ausgehen. Netze dieser Art weisen in aller Regel eine Eigenschaft auf, die »skalenfrei« *(scale-free)* genannt wird.

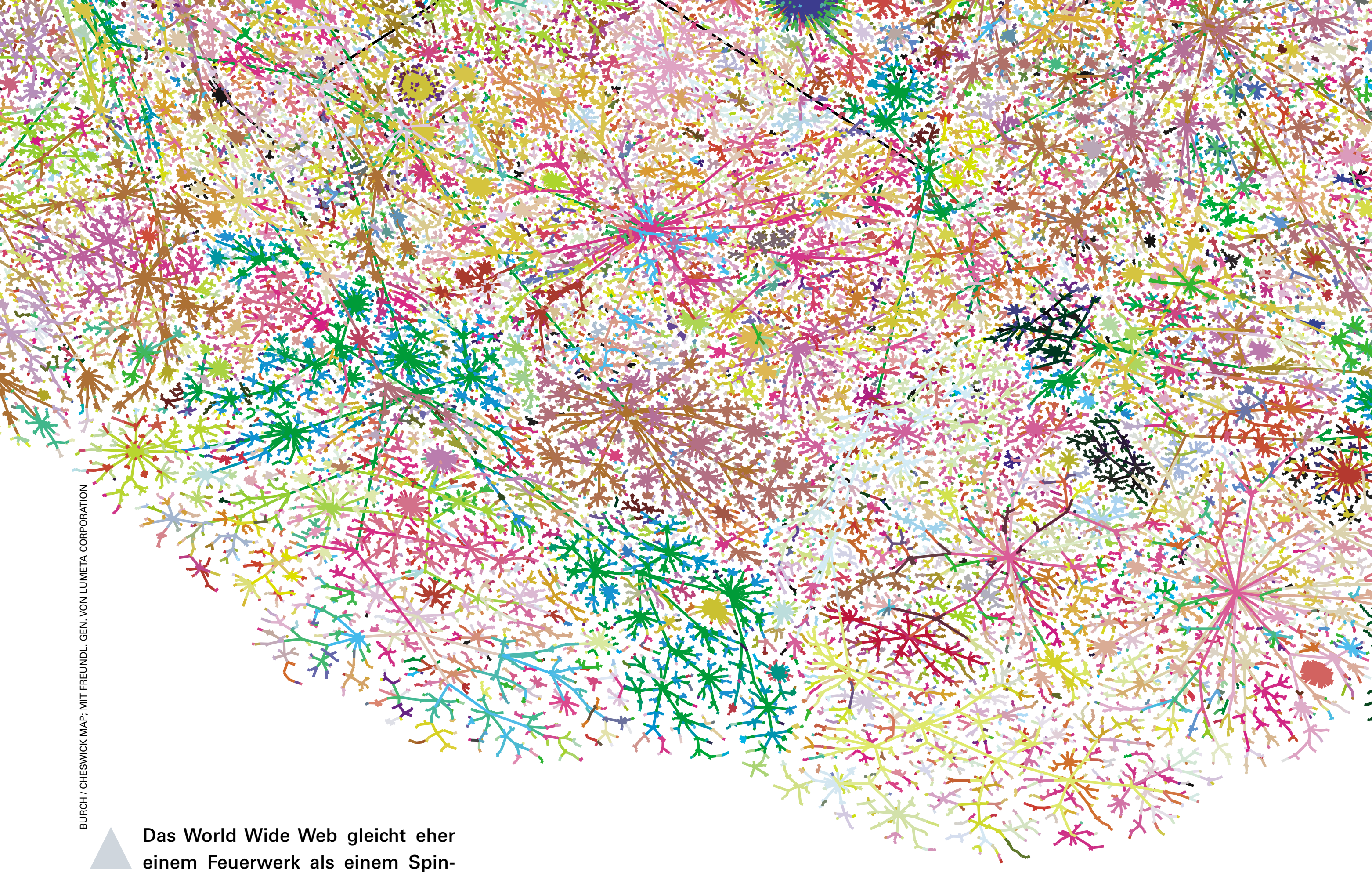
Ein besserer Name wäre »maßstabslos«. Gemeint ist nämlich: In skalenfreien Netzen gibt es keine Knotengröße, die als »normal« und damit als Maßstab gelten könnte. Es ist also nicht etwa so, dass die überwiegende Mehrheit aller Knoten die Größe – sagen wir – 6 hätte und die anderen von dieser Größe mehr oder weniger zufällig nach unten abwichen. Vielmehr sind die Knoten umso zahlreicher, je kleiner sie sind, und zwar so, dass keine Größe bevorzugt ist (Einzelheiten siehe unten).

Skalenfreie Netze haben regelmäßig – vorhersagbar – einige gemeinsame Eigenschaften. So sind sie bemerkenswert widerstandsfähig gegen zufällige Funktionsstörungen, aber äußerst anfällig gegenüber koordinierten Angriffen.

Im Gegensatz zu früheren Theorien finden wir nun in sehr unterschiedlichen komplexen Systemen gemeinsame Prinzipien. Deren Kenntnis ist in Anwendungen umsetzbar. So findet man neue Strategien zur Entwicklung von Medikamenten, zum Schutz des Internets vor Hacker-Angriffen und zur Eindämmung tödlicher Epidemien.

## Netze ohne Maßstab

Die traditionelle Theorie der komplexen Netze beginnt mit den Arbeiten zweier ungarischer Mathematiker, des unvergleichlichen Paul Erdős (1913–1996) und seines engen Mitarbeiters Alfréd Rényi (1921–1970). In einer Veröffentlichung von 1959 präsentierten sie für Netze, wie man sie in Nachrichtentechnik und Biologie betrachtet, ein einfaches und elegantes Modell: Ein Zufallsprozess knüpft Verbindungen innerhalb



BURCH / CHESWICK MAP; MIT FREUNDL. GEN. VON LUMETA CORPORATION

**Das World Wide Web gleicht eher einem Feuerwerk als einem Spinnennetz: Aus einzelnen Knoten sprießen sehr viele Linien, die ihrerseits nur an einem einzigen Knoten enden. Abgebildet ist eine Momentaufnahme vom 6. Februar 2003, die (direkte und indirekte) Verbindungen von einer Test-Website zu 100 000 anderen enthält. Ähnliche Adressen sind durch gleiche Farben gekennzeichnet.**

einer vorgegebenen Menge von Knoten. Der Zugang war so fruchtbar, dass die Graphentheorie zu neuem Leben erwachte und die »Theorie der zufälligen Netze« zu einem veritablen Zweig der Mathematik heranwuchs.

Wie bei Zufallsprozessen üblich, herrscht unter den Knoten Chancengleichheit: Jede der Verbindungen, die durch den Zufallsprozess etabliert werden, trifft jeden der Knoten mit der gleichen Wahrscheinlichkeit. Im Ergebnis sind die Verbindungen ziemlich gleich verteilt, und die relativen Abweichungen werden mit zunehmender Anzahl der Verbindungen immer geringer. Sortiert man die Knoten nach Größe (sprich Anzahl ihrer Verbindungen), so ergibt sich die so genannte Poisson-Verteilung: Die Kurve ist glockenförmig, die Größen der Knoten häufen sich um einen Mittelwert herum, und Knoten mit viel mehr oder viel weniger Verbindungen sind eher die Ausnahme. (Wenn dieser Mittelwert selbst eine große Zahl ist, dann ist die Kurve der Poisson-Verteilung von der bekannten Gauß'schen Glockenkurve kaum zu unterscheiden.) Netze dieser Art nennt man auch »exponentiell«, weil die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Knoten mit genau $k$ anderen Knoten verbunden ist, mit wachsendem $k$ exponentiell abnimmt.

Für diese Netze hat sich der Name »zufällige Netze« *(random networks)* eingebürgert, der inzwischen irreführend ist: Auch die skalenfreien Netze stellt man sich durch einen Zufallsprozess entstanden vor – aber eben einen anderen.

Ein zufälliges Netz im Sinne von Erdős und Rényi erwarteten wir auch zu finden, als wir 1998 gemeinsam mit Hawoong Jeong und Réka Albert von der Universität von Notre Dame (Indiana) das World Wide Web zu kartieren begannen. Die Voraussetzungen schienen zweifelsfrei erfüllt: Ein Mensch, der sich zu entscheiden hat, mit welchen anderen Seiten im Internet er seine ins Netz gestellten Dokumente per Hyperlink verbinden soll, wird sich in erster Linie von seinen persönlichen Interessen leiten lassen. Angesichts der großen Anzahl an Teilnehmern und Websites ist das Muster der Einzelinteressen von einem Zufallsmuster nicht zu unterscheiden – dachten wir.

Die Messungen widerlegten diese Erwartung. Für unser Vorhaben hatten wir ein Programm geschrieben, das von einer Internetseite zur nächsten springt und dabei so viele Verbindungen sammelt, wie es nur kann. Aus den so gesammelten Daten erstellte es ein Verknüpfungsschema, eine Art abstrakter Landkarte, die zwar nur einen winzigen Ausschnitt des Internets wiedergab, aber gleichwohl eine Überraschung bot: Das World Wide Web wird im Wesentlichen von sehr wenigen, sehr großen (verbindungsreichen) Knoten zusammengehal- ▷

ten (Bild S. 63). Mehr als 80 Prozent der Seiten auf unserer Karte haben weniger als vier Verknüpfungen, aber eine kleine Minderheit von weniger als 0,01 Prozent aller Knoten jeweils mehr als tausend! Eine spätere Suche fand sogar ein Dokument, auf das mehr als 2 Millionen anderer Seiten verweisen.

Darüber hinaus ergab die Sortierung der Internetseiten nach Größe, dass ihre Verteilung nicht exponentiell ist, sondern einem »Potenzgesetz« *(power law)* folgt: Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein beliebiger Knoten genau $k$ Verbindungen aufweist, ist ungefähr proportional zu $1/k^n$. Wenn man die Zählung auf »eingehende« Verbindungen beschränkt, also Hyperlinks, die nicht auf der Website selbst stehen, sondern von anderen auf sie verweisen, ergibt sich für den Exponenten $n$ etwa der Wert 2. Das heißt, Knoten mit $k$ eingehenden Verbindungen sind ungefähr viermal so häufig wie solche mit der doppelten Anzahl $2k$.

Die Verteilungskurve eines Potenzgesetzes unterscheidet sich erheblich von den Glockenkurven, die für zufällige Netze typisch sind. Sie hat nicht das ausgeprägte Maximum bei der typischen Größe, sondern fällt monoton: Mit zunehmender Größe nimmt die Anzahl der Knoten ab. In einer doppeltlogarithmischen Darstellung erscheint sie als Gerade (Bild rechts oben). Von der Chancengleichheit der Zufallsnetze kann keine Rede mehr sein: Wenige Naben, wie Yahoo und Google im Internet, dominieren das ganze Netz.

In zufälligen Netzen kommen Naben nicht vor – sie sind einfach unmöglich. Dass wir bei unserer Kartierung des Internets derartig große Knoten vorfanden, war demnach ungefähr so überraschend, als wären wir bei einer Messung menschlicher Körpergrößen (die zweifelsfrei glockenförmig verteilt sind) auf eine beträchtliche Anzahl von Dreißigmetermenschen gestoßen.

Ist die Aufmerksamkeit erst einmal geweckt, finden sich skalenfreie Netze allenthalben. Im Gegensatz zu unserer Untersuchung, die sich auf die Hyperlinks als Verbindungen konzentrierte, analysierten Michalis Faloutsos von der Universität von Kalifornien in Riverside, Petros Faloutsos von der Universität Toronto und Christos Faloutsos von der Carnegie-Mellon-Universität in Pittsburgh (Pennsylvania) die physikalische Struktur des Internets. Ein Knoten in diesem Netz ist ein Kommunikationsrechner (Router), und eine Verbindung ist ein (gewöhnliches oder Glasfaser-)Kabel zwischen Routern. Die drei Brüder, sämtlich Informatiker, fanden, dass dieses Netz ebenfalls skalenfrei ist.

## Sexualkontakte mit Potenzgesetz

Das gilt auch für soziale Netze. So untersuchten Wissenschaftler der Universitäten in Boston und Stockholm das Netz der Sexualkontakte zwischen Menschen und fanden auch hier eine Verteilung nach dem Potenzgesetz: Die meisten Menschen haben in ihrem Leben nur wenige Geschlechtspartner, einige wenige (die »Naben«) dagegen Hunderte. Eine neuere Untersuchung unter Leitung von Stefan Bornholdt vom Interdisziplinären Zentrum für Bioinformatik der Universität Leipzig ergab, dass das durch elektronische Post geknüpfte Netz – zwischen zwei Menschen besteht eine Verbindung, wenn sie einander eine E-Mail geschrieben haben – skalenfrei ist. Das Gleiche gilt, wenn als Verbindung unter Wissenschaftlern definiert wird, dass der eine den anderen in einer Veröffentlichung zitiert, wie Sidney Redner von der Universität Boston ermittelte.

Oder man nennt es eine Verbindung, wenn zwei Wissenschaftler gemeinsam eine Arbeit verfassen. Das so definierte Netz ist skalenfrei für Angehörige unterschiedlichster Disziplinen, darunter Ärzte und Computerwissenschaftler, wie Mark Newman von der Universität von Michigan in Ann Arbor zeigte. Das bestätigte unsere eigenen Untersuchungen über Mathematiker und Neurologen. Interessanterweise ist die wahrscheinlich größte Nabe der Mathematikergemeinschaft Paul Erdős, der mehr als 1400 Artikel mit nicht weniger als 500 Koautoren verfasste.

Skalenfreie Netze gibt es auch im Geschäftsleben; als Verbindung zählt dabei eine Kooperations- oder Lizenzvereinbarung. Walter W. Powell von der Universität Stanford (Kalifornien), Douglas R. White von der Universität von Kalifornien in Irvine, Kenneth W. Koput von der Universität von Arizona und Jason-Owen Smith von der Universität von Michigan analysierten entsprechende Datenbanken der biotechnologischen Industrie der USA und entdeckten auch hier Naben: Unternehmen wie Genzyme, Chiron und Genentech haben eine unverhältnismäßig große Anzahl von Partnerschaften mit anderen Firmen. Forscher in Italien werteten eine von der Universität Siena erstellte Datenbank für die chemische Industrie aus, die Informationen über etwa 20 100 wissenschaftliche Kooperationsabkommen unter mehr als 7200 Einrichtungen umfasst. Sie fanden, dass die von Powell und seinen Kollegen entdeckten Naben tatsächlich zu einem skalenfreien Netz gehören.

Wesentlich abstrakter sind skalenfreie Netze in der Biologie. Ein Knoten in dem Netz ist ein Molekül, und eine Verbindung besteht zwischen ihnen, wenn beide an einer biochemischen Reaktion beteiligt sind. Gemeinsam mit Zoltán Oltvai, einem Zellbiologen von der Northwestern University in Evanston (Illinois), fanden wir eine skalenfreie Struktur im Stoffwechselsystem der Zellen von 43 verschiedenen Organismen aus allen drei Urreichen des Lebens, darunter *Archaeoglobus fulgidus* (ein Archaebakterium), *Escherichia coli* (ein Eubakterium) und *Caenorhabditis elegans* (ein Eukaryont). Das Stoffwechselsystem betraf die Energiegewinnung aus der Nahrung durch die Aufspaltung komplexer Moleküle in einer Zelle. Wir fanden, dass die meisten Moleküle nur in einer oder zwei Reaktionen eine Rolle spielen, während einige wenige »Naben«, darunter Wasser und Adenosintriphosphat

## IN KÜRZE

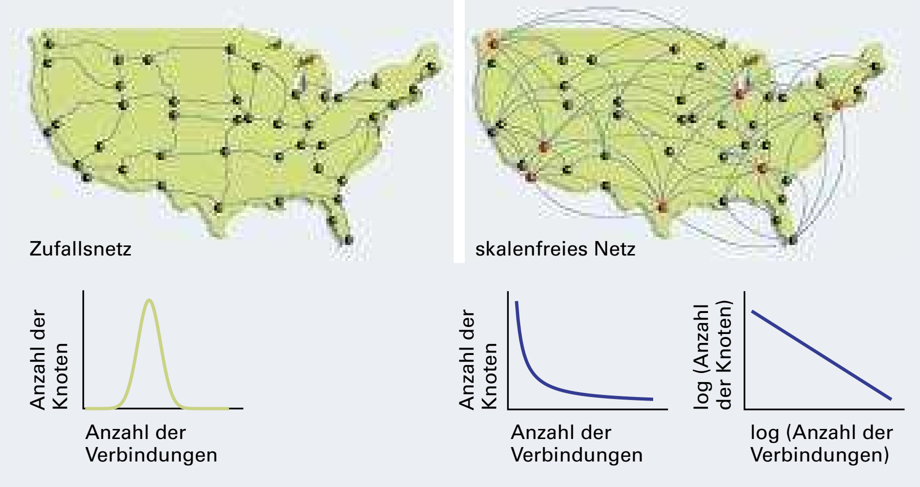
▶ **Zahlreiche komplexe Netze** haben eine wichtige Eigenschaft gemeinsam: Einige Knoten verfügen über sehr viele Verbindungen zu anderen, die meisten dagegen nur über sehr wenige. Es gibt keine typische Anzahl an Verbindungen pro Knoten. Dem Netz fehlt eine Skala, das heißt ein innerer Maßstab.

▶ **Skalenfreie Netze** weisen bestimmte typische Merkmale auf. Zum Beispiel sind sie unempfindlich gegen zufällige Störungen, aber anfällig gegen gezielte Angriffe.

Diese Erkenntnis ist nutzbar für **Anwendungen**, zum Beispiel für bessere Strategien zum Schutz des Internets gegen Computerviren.

## Autobahn- und Flugliniennetz der USA

**Ein typisches Zufallsnetz** ist das Autobahnnetz der USA (links, vereinfacht). Trägt man die Anzahl der Knoten mit einer, zwei, drei … Verbindungen in einem Diagramm auf, ergibt sich eine Glockenkurve: Die meisten Knoten haben annähernd dieselbe Anzahl an Verbindungen. In skalenfreien Netzen wie dem Flugliniennetz der USA (rechts, vereinfacht) ist die Verteilungsfunktion dagegen monoton fallend und erscheint in der doppeltlogarithmischen Darstellung als Gerade: Es gibt wenige verbindungsreiche Knoten (»Naben«) und viele verbindungsarme.




SLIM FILMS

(ATP), an der Mehrzahl aller Reaktionen beteiligt sind.

Auch die Proteine einer Zelle bilden ein skalenfreies Netz. Dabei werden zwei Proteine als verbunden angesehen, wenn sie (soweit wir wissen) miteinander reagieren. Die Bäckerhefe, eine der einfachsten Zellen mit Zellkern, enthält Tausende von Proteinen, die zu einem skalenfreien Netz verknüpft sind: Die meisten von ihnen reagieren lediglich mit einem oder zwei anderen, aber manche binden sich physikalisch an eine immense Anzahl anderer Proteine (Bild S. 69). Ähnliche Verhältnisse zeigten sich auch bei den Proteinen eines ganz anderen Organismus, des einfachen Bakteriums *Helicobacter pylori*.

### Ursachen der Skalenfreiheit

Diese überreiche Ernte an skalenfreien Strukturen wirft eine wichtige Frage auf: Wie können so grundverschiedene Systeme wie eine Zelle und das Internet denselben Gesetzen genügen? Über ihre Skalenfreiheit hinaus haben diese Strukturen nämlich noch eine weitere merkwürdige Gemeinsamkeit: Aus noch unbekannten Gründen liegt der Wert des Exponenten $n$ im Potenzgesetz $1/k^n$ in der Regel zwischen 2 und 3.

Vor dieser Frage stellt sich noch eine andere: Warum kann die hoch gelobte Theorie zufälliger Netze die Existenz von Naben nicht erklären? Bei näherer Betrachtung stellt sich heraus, dass zwei wesentliche Voraussetzungen des ursprünglichen Modells von Erdős und Rényi nicht erfüllt sind.

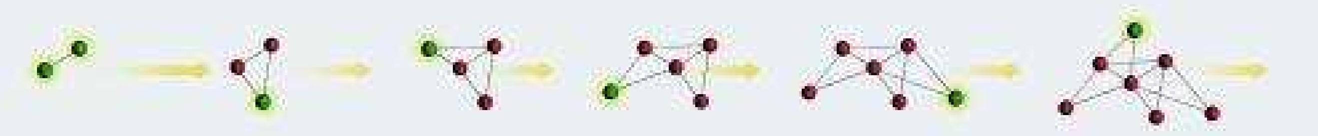
Erstens gingen die beiden Ungarn davon aus, dass alle Knoten von Beginn an vorhanden sind und die Verbindungen erst danach geknüpft werden. Dagegen ist die Anzahl der Dokumente im Internet alles andere als konstant. Immerhin ist das World Wide Web in wenig mehr als zehn Jahren von null auf mehr als drei Milliarden Seiten angewachsen. Auch sexuelle oder wissenschaftliche Beziehungsnetze legen dadurch zu, dass stets Neulinge eine Beziehung suchen. Ein neuer Router im Internet wartet nicht, bis ihn das Zufallsereignis einer Verbindung trifft, sondern wird gezielt an einen anderen Router angeschlossen, der bereits im Netz hängt. Allgemein gilt: Je älter ein Knoten ist, desto mehr Gelegenheiten hatte er, sich eine Verbindung zuzulegen. Aus diesem Grund sind tendenziell die Knoten umso größer, je länger sie schon im Netz sind.

Zweitens sind – über den Altersunterschied hinaus – nicht alle Knoten gleich. Wer eine neue Seite ins Internet stellt und sie an andere anbinden möchte, hat im Prinzip die Auswahl unter mehreren Milliarden Adressen. Davon kennen die meisten von uns aber nur einen winzigen Bruchteil, und zwar vorrangig die Seiten, die man leichter findet, weil sie schon viele Verbindungen haben. Indem man sich an diese bevorzugten Knoten hängt, bestärkt man noch diese Bevorzugung (Bild S. 66/67).

Diese »Verknüpfungsvorliebe für die Großen« *(preferential attachment)* gibt es auch anderswo. Im Internet schließt man neue Router bevorzugt an viel benutzte Router an, die typischerweise über eine größere Bandbreite verfügen. In der Biotech-Industrie der Vereinigten Staaten üben die gut etablierten Firmen wie Genzyme eine größere Anziehungskraft für Kooperationen aus; jede bereits bestehende Zusammenarbeit erhöht wiederum die Attraktivität der Firma für künftige Partnerschaften. Viel zitierte Artikel in der wissenschaftlichen Literatur werden viel gelesen und, wenn sie dadurch als Grundlage neuer Arbeiten dienen, auch wieder zitiert. Dieses Phänomen nennt der bekannte Soziologe Robert K. Merton den »Matthäus-Effekt«: »Denn wer da hat, dem wird gegeben, dass er die Fülle habe; wer aber nicht hat, dem wird auch das genommen, was er hat« (Matthäus 13, Vers 12).

Diese beiden Mechanismen – Wachstum und Verknüpfungsvorliebe – helfen, die Existenz von Naben zu erklären: Neu auftretende Knoten verbinden sich bevorzugt mit den größeren Knoten, die bereits beliebten Stellen sammeln dadurch mit der Zeit noch mehr Verbindungen als ihre armen Nachbarn und werden demnach in der Tendenz eher zu Naben.

Gemeinsam mit Réka Albert haben wir mit Hilfe von Computersimulationen und Berechnungen gezeigt, dass ein wachsendes Netz mit Verknüpfungsvorliebe für die Großen tatsächlich skalenfrei wird und die Verteilung seiner Knotengrößen sich einem Potenzgesetz nähert. Dieses theoretische Modell ist zwar stark vereinfacht und muss noch auf den jeweiligen Einzelfall angepasst werden; aber es liefert immerhin den guten Ansatz einer Erklärung dafür, dass skalenfreie Netze in der realen Welt so allgegenwärtig sind. ▷



▷ Für ein biologisches System konnten Andreas Wagner von der University of New Mexico in Albuquerque und David A. Fell von der Oxford Brookes University in Oxford (England) diese Erklärung bestätigen: Sie fanden heraus, dass die größten Knoten zugleich die ältesten sind. Die meistverknüpften Moleküle im Stoffwechselnetz von *Escherichia coli* haben eine lange Evolutionsgeschichte. Einige stammen vermutlich noch aus der so genannten RNA-Welt (dem Zeitalter vor dem Auftreten der DNA), andere gehören zu den entwicklungsgeschichtlich ältesten Reaktionsketten.

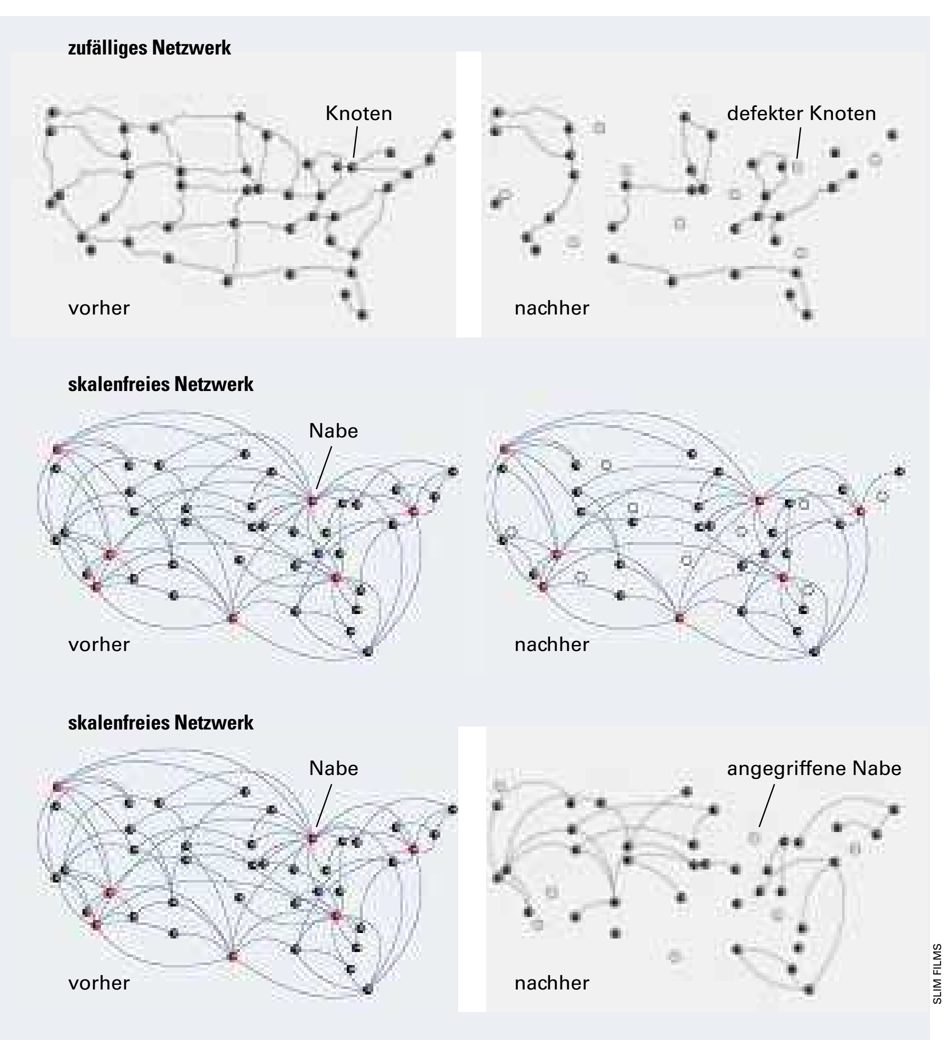
Interessanterweise folgt die Verknüpfungsvorliebe in der Regel einem linearen Gesetz. Das heißt, ein neuer Knoten knüpft zwar seine Verbindungen zum bereits existierenden Netz nach dem Zufallsprinzip. Aber nehmen wir an, das Netz enthält gleich viele Knoten der Größe 100 wie der Größe 50, dann ist die Vorliebe des neuen Knotens für die Großen gerade so groß, dass er doppelt so viele Verbindungen zu den Hunderterknoten etabliert wie zu den Fünfzigern. Der bereits erwähnte Sidney Redner hat gemeinsam mit anderen Forschern verschiedene Typen von Verknüpfungsvorliebe untersucht. Ihr Ergebnis: Wenn die Vorliebe schneller als linear mit der Knotengröße ansteigt, sodass ein doppelt so großer Knoten nicht nur die doppelte, sondern zum Beispiel die vierfache Beliebtheit genießt, dann zieht im Allgemeinen eine Nabe den Löwenanteil aller Verbindungen an sich. Man weiß zwar vorher nicht, wer dieser Sieger ist, aber am Ende ist das Netz im Wesentlichen sternförmig: In der Mitte sitzt der Sieger mit Verbindungen zu (fast) allen anderen, die untereinander kaum verbunden sind.

Da das alltägliche Funktionieren der Gesellschaft zunehmend von Strom- und Kommunikationsnetzen abhängig wird, erhebt sich immer öfter die besorgte Frage, wie zuverlässig diese Netze sind. Die gute Nachricht ist: Komplexe Systeme können erstaunlich robust gegen zufällig auftretende Störungen sein. Zu jedem beliebigen Zeitpunkt sind im Internet mehrere hundert Router außer Betrieb, ohne dass dies das Netz merklich beeinträchtigen würde. Lebende Systeme sind ähnlich robust: Der Mensch spürt es meistens überhaupt nicht, wenn viele seiner Zellen Mutationen erleiden oder ihre Funktion nicht mehr erfüllen. Woher kommt diese Robustheit?

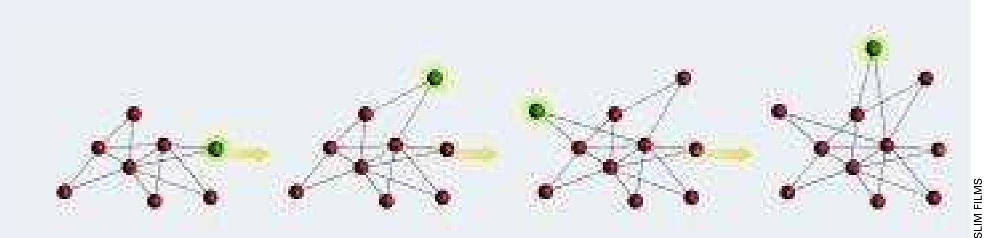
## Zerstörbare Zufallsnetze

Wenn sehr viele Knoten ausfallen, muss das Netz irgendwann in lauter isolierte Teilstücke zerfallen – sollte man meinen. Für zufällige Netze trifft das zweifellos auch zu. Wird eine kritische Zahl von Knoten entfernt, dann zerbricht ein solches System in winzige Inseln, die keinen Kontakt miteinander haben. Skalenfreie Netze zeigen jedoch in Simulationen ein anderes Verhalten: Wenn man per Zufall bis zu 80 Prozent aller Router im Internet ausschalten würde, käme man auf dem verbleibenden Netz immer noch von jedem Knoten zu jedem anderen (Bild links). Ebenso schwierig ist es, das Netz der Proteinreaktionen einer Zelle zu zerreißen: Nach unseren Beobachtungen setzen selbst nach einer großen Anzahl zufällig gesetzter Mutationen die nicht betroffenen Proteine ihr Zusammenwirken fort.

Diese Robustheit skalenfreier Netze beruht – wen wundert's – auf ihrer Skalenfreiheit, genauer: darauf, dass die




◀ **Gegen zufällig auftretende Schäden ist ein skalenfreies Netz (Mitte) wesentlich unempfindlicher als ein Zufallsnetz (oben). Allerdings kann es durch einen gezielten Angriff auf seine Naben (unten) in Stücke gerissen werden.**


SLIM FILMS

Knoten mit abnehmender Größe immer zahlreicher werden. Ein zufälliger Ausfall trifft daher mit der größten Wahrscheinlichkeit die kleinsten Knoten, die zum Zusammenhalt des Netzes wenig oder gar nichts beitragen.

Wenn es aber doch eine Nabe trifft, ist der Schaden groß. In Simulationen fanden wir, dass bereits die Entfernung weniger wichtiger Naben aus dem Internet das Netz in lauter kleine Inseln zerlegen würde. Ähnlich im biochemischen Netz der Hefe: Wenn man (durch so genannte Knock-out-Gene) reich verknüpfte Proteine aus dem Stoffwechselsystem herausnimmt, stirbt die Zelle mit weitaus höherer Wahrscheinlichkeit, als wenn ein beliebiges Protein betroffen ist.

Die Widerstandsfähigkeit gegenüber Zufallsschäden und die Empfindlichkeit gegenüber gezielten Angriffen können je nach Situation ein Vorteil oder ein Nachteil sein. Erstere ist hilfreich sowohl für das Internet als auch für die Zelle. Wenn eine Krankheitserregerzelle eine empfindsame Nabe hat, dann könnte es ein Medikament geben, das durch Ausschalten dieser Nabe die ganze Zelle umbringt, ohne den Körperzellen des Menschen etwas anzutun. Andererseits könnte eine kleine Gruppe versierter Hacker das ganze Internet durch einen gezielten Angriff auf seine Naben lahm legen.

Nach neueren Untersuchungen geht das relativ schnell. Ein skalenfreies Netz bricht zusammen, wenn zwischen 5 und 15 Prozent seiner Naben zerstört werden. Nach unseren Simulationen würde ein Angriff auf das Internet, der die Naben der Reihenfolge nach zerstört – die größte zuerst, dann die zweitgrößte und so weiter –, bereits nach wenigen Treffern erheblichen Schaden anrichten. Es erscheint also zweckmäßig, diesen höchstverbundenen Knoten im Internet besonderen Schutz gegen böswillige Angriffe angedeihen zu lassen.

Die Verletzlichkeit eines Netzes hängt allerdings stark von seiner individuellen Struktur ab. So wäre eine eigene Untersuchung erforderlich, um beispielsweise die Frage zu beantworten, ob der Konkurs von Naben wie Genzyme und Genentech zum kompletten Zusammenbruch der Biotech-Industrie der USA führen würde.

**▲ Ein skalenfreies Netz wächst von zwei auf elf Knoten an, indem jeder neue Knoten (grün) zwei Verbindungen zu bereits existierenden Knoten (rot) knüpft, und zwar mit umso höherer Wahrscheinlichkeit, je mehr Verbindungen der »empfangende« Knoten schon hat.**

Ein Schaden ganz anderer Art, der ein Netz treffen kann, ist eine ansteckende Krankheit, wobei die Ansteckung entlang der Verbindungen des Netzes verläuft. Klassisches Beispiel sind die Geschlechtskrankheiten: Ein Knoten des sexuellen Beziehungsnetzes steckt nur diejenigen an, mit denen er Kontakt hat. Aber das abstrakte Modell ist allgemeiner; es passt auf Epidemien aller Art, Gerüchte, Moden und im Internet natürlich auch auf Computerviren.

### Unaufhaltsame Computerviren

Epidemiologen und Marketingexperten pflegen derartige Ausbreitungsvorgänge als Diffusionsprozesse zu modellieren: Ein Individuum ist umso stärker bedroht, je mehr von seinesgleichen in seiner unmittelbaren Umgebung bereits erkrankt sind und je höher die Kontagiosität, das heißt je ansteckender die Krankheit ist. Aus diesen seit Jahrzehnten studierten Modellen ergibt sich ein Schwellenwert für die Kontagiosität, der bestimmt, wie eine Epidemie in einer Population verläuft. Jedes Virus, jede Krankheit und auch jede Mode, die weniger ansteckend ist, als dieser Wert angibt, stirbt unweigerlich aus. Diejenigen jedoch, die ansteckender sind, verbreiten sich exponentiell und befallen schließlich das gesamte System.

Romualdo Pastor-Satorras von der Technischen Hochschule von Katalonien in Barcelona und Alessandro Vespigniani vom Internationalen Zentrum für Theoretische Physik in Triest haben vor kurzem diesen Schwellenwert für ein skalenfreies Netz berechnet und kamen zu dem erschreckenden Ergebnis, dass dieser Wert gleich null ist: Alle Viren, selbst die, die kaum ansteckend sind, breiten sich unaufhaltsam im System aus und überdauern dort. Das erklärt, warum das Virus »I love you«, das bisher von allen Computerviren den größten Schaden anrichtete (immerhin legte es im Jahr 2000 das britische Parlament lahm), ein Jahr nach seiner angeblichen Ausrottung noch immer eines der verbreitetsten Viren war.

Ursache dieser Anfälligkeit ist die herausgehobene Stellung der Naben. Da sie zu vielen anderen Knoten Verbindungen haben, holt sich in der Regel mindestens eine von ihnen die Krankheit von einem ihrer zahlreichen Verbindungspartner. Dann aber gibt es kein Halten mehr: Die infizierte Nabe steckt über ihre vielen Verbindungen zahlreiche andere Knoten an, darunter auch weitere Naben, sodass die Krankheit das gesamte System befällt.

Da offensichtlich zahlreiche soziale Netze skalenfrei sind, sollte das den Epidemiologen und Gesundheitspolitikern zu denken geben. Demnach wäre nämlich eine herkömmliche Impfkampagne, bei der man nur einen Teil der Bevölkerung behandelt und darauf vertraut, dass damit die Ansteckungskette an genügend vielen Stellen unterbrochen wird, ineffektiv oder gar wirkungslos. Solange man nicht gezielt die Naben des Netzes ausschaltet, das heißt die entsprechenden Leute impft, bleibt das Netz zusammenhängend, und die Krankheit kann sich ausbreiten. Um durch Impfungen nach dem Zufallsprinzip das Netz wirksam zu zerreißen, müsste nahezu jeder geimpft werden (zum Beispiel bei Masern 90 Prozent der Bevölkerung), damit keine Nabe ausgelassen wird. Derselbe Effekt könnte durch die Impfung eines viel kleineren Bevölkerungsteils erreicht werden – vorausgesetzt, alle Naben sind darunter.

Allerdings ist es sehr schwierig, in einem konkreten sozialen Netz die Naben ausfindig zu machen. Aber Reuven Cohen und Shlomo Havlin von der Bar-Ilan-Universität in Ramat-Gan (Israel) sowie Daniel ben-Avraham von der Clarkson-Universität in Potsdam (New York) fanden ein genial einfaches Näherungsverfahren: Man beginne mit wenigen zufällig ausgewählten Personen, wähle wiederum per Zufall einen kleinen Teil von deren persönlichen Bekannten, von den persönlichen Bekannten dieser Bekannten und so weiter. Unter ▷

▷ den so ausgewählten Personen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die Naben, denn diese stehen mit besonders vielen Personen in Verbindung. Selektiv nur diese Personen zu impfen ist ethisch nicht unproblematisch, denn viele Bekannte zu haben ist nicht gerade ein Verdienst, das eine Vorzugsbehandlung – wie die Impfung gegen eine gefährliche Krankheit – rechtfertigen würde. Aber in Ländern oder Regionen, in denen die Mittel zur Behandlung der gesamten Bevölkerung nicht zur Verfügung stehen, kann das aus pragmatischen Gründen die beste Strategie sein.

Wenn es nicht um eine Krankheit, sondern um eine Idee oder die Begeisterung für ein neues Produkt geht, wollen die Verfechter die Verbreitung natürlich nicht eindämmen, sondern fördern. Dass manche »Multiplikatoren« dabei wirksamer sind als andere, wissen die Marketingexperten schon lange. Aber mit der Theorie skalenfreier Netze können sie ihr Geschäft jetzt wissenschaftlich fundiert betreiben.

Bisher haben wir in der Theorie von solchen Einzelheiten abgesehen und die vielen Netzen gemeinsamen abstrakten Strukturen studiert. Dabei wurden erhebliche Erfolge erzielt. So hat die Erkenntnis, dass das Internet nicht ein Zufallsnetz, sondern skalenfrei ist, umfangreiche Aktivitäten zur Verbesserung seiner Funktion ausgelöst. Impfpläne haben ebenfalls von diesen abstrakten Modellen profitiert; wenn man die Vernetzungsstruktur des Geschäftslebens besser kennt, könnte man auch lawinenartige Zusammenbrüche, bei denen der Konkurs einer Firma viele andere mit in den Abgrund reißt, verstehen und vielleicht sogar beherrschen.

Ist denn nun praktisch jedes Netz skalenfrei? Keineswegs! Autobahnnetze

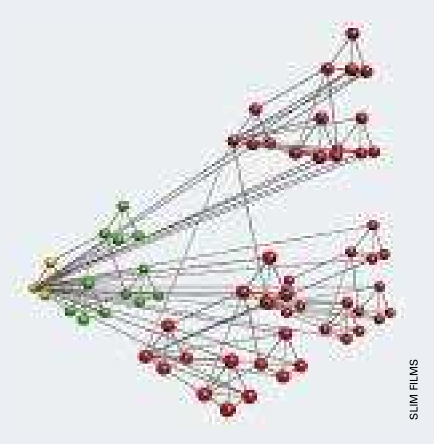
## Die Welt ist klein

**Stanley Milgram, Sozialpsychologe** an der Harvard-Universität, schickte im Jahre 1967 Hunderte von Briefen an Menschen in Nebraska. Darin bat er sie, diese Nachricht an einen persönlichen Bekannten weiterzugeben, der sie wieder an einen Bekannten weiterreichen sollten, und so weiter, bis sie schließlich bei dem namentlich genannten Empfänger, einem Börsenmakler in Boston, eintreffen würde. Um die einzelnen Wege verfolgen zu können, bat er die Teilnehmer auch, ihm eine Postkarte zu schicken, sowie sie den Brief weitergeleitet hatten. Die Briefe, die schließlich ihren Bestimmungsort erreichten, hatten im Durchschnitt sechs Zwischenstationen durchlaufen – daher die populäre Vorstellung, dass zwei beliebige Personen nur sechs Stationen (»Händedrücke«) voneinander entfernt sind.

Einen so weit reichenden Schluss gibt Milgrams Arbeit nicht her (die meisten der Briefe hatten den Endempfänger nie erreicht); gleichwohl finden sich Eigenschaften einer »Kleinen Welt« in anderen Netzen. So konnten wir zeigen, dass zwei beliebige chemische Stoffe in einer Zelle fast immer über nur drei Reaktionen miteinander verbunden sind. Im World Wide Web mit seinen mehr als drei Milliarden Dokumenten liegen zwei Seiten typischerweise 19 Klicks auseinander.

**Hinter einer Kleinen Welt** steckt nicht unbedingt ein magisches Organisationsprinzip. Selbst ein großes Netz mit rein zufällig gesetzten Verbindungen hat in der Regel diese Eigenschaft. Stellen Sie sich vor, Sie hätten hundert Bekannte. Kennt jeder von ihnen seinerseits hundert andere, dann sind bereits 10 000 Menschen lediglich zwei Händedrücke von Ihnen entfernt. Über drei Händedrücke erreichen Sie eine Million Menschen und über fünf Händedrücke reichlich anderthalbmal die gesamte Erdbevölkerung. So gesehen, scheint an der Regel von den sechs Händedrücken nichts Bemerkenswertes.

Aber die Sache ist etwas komplizierter. Für unsere Rechnung haben wir stillschweigend unterstellt, dass Ihre Bekannten sich untereinander nicht kennen. In Wirklichkeit kommen schon in der zweiten Stufe weit weniger als 10 000 Menschen zusammen. Die Gesellschaft zerfällt in lose Gruppierungen *(clusters)*, die durch Zugehörigkeit zur gleichen Schicht oder ähnliche Interessen zusammengehalten werden. Seit dem bahnbrechenden Werk von Mark Granovetter, damals Doktorand in Harvard, aus den 1970er Jahren wird dieses Faktum in der soziologischen Literatur intensiv diskutiert.



SLIM FILMS

**Ein Cluster (gelbe Punkte) kann Bestandteil eines größeren, loseren Clusters sein (grüne und gelbe Punkte), der wiederum zu einem noch größeren Cluster (rote, grüne und gelbe Punkte) gehört. Im World Wide Web könnte zum Beispiel der kleinste Cluster sich um das Thema Liebesleben der Maikäfer ranken, der mittelgroße um Maikäfer allgemein und der große um Käfer.**

**Gruppenbildung** *(clustering)* kommt in den verschiedensten Netzen vor. Duncan Watts und Steven Strogatz, damals an der Cornell-Universität in Ithaca (New York), fanden sie 1998 im Stromnetz der USA ebenso wie im Nervensystem des Wurms *Caenorhabditis elegans*.

Auf den ersten Blick scheint diese Gruppenbildung dem Prinzip der Skalenfreiheit zu widersprechen – gerade die Naben mit ihren vielen Verbindungen würden solche isolierten Cluster ja ohne weiteres zusammenbinden. Wir konnten jedoch unlängst zeigen, dass die beiden Eigenschaften miteinander vereinbar sind: Ein Netz kann sowohl weit gehend in Gruppen aufgeteilt als auch skalenfrei sein, wenn nämlich winzige, eng verknüpfte Gruppen von Knoten sich zu größeren, weniger dicht vernetzten Haufen zusammenfinden (Bild). Dies scheint in einigen Systemen vorzukommen; so bestehen Clusters im World Wide Web aus Seiten zu ein und demselben Thema, die alle aufeinander verweisen, und in einer Zelle aus allen Molekülen, die an einer bestimmten Funktion beteiligt sind.

Das Netz der Proteine innerhalb einer Hefezelle. Rot gekennzeichnet sind lebensnotwendige Proteine (ihr Ausfall führt zum Zelltod), orange diejenigen, deren Ausfall das Zellwachstum verlangsamt. Die grün gekennzeichneten sind von geringerer Bedeutung, und die Funktion der gelben ist unbekannt.

MIT FREUNDL. GEN. VON HAWOONG JEONG

und elektrische Hochspannungsleitungsnetze sind bedeutende Ausnahmen, ebenso Kristallgitter: Alle Atome haben annähernd die gleiche Anzahl von Bindungen zu ihren Nachbarn. Nahrungsnetze – zwei Tierarten gelten als verbunden, wenn eine die andere frisst – sind zu klein, als dass man klare Aussagen über ihren Typ treffen könnte. Dagegen ist das Netz der Neuronen im menschlichen Gehirn zwar alles andere als klein, aber noch nie auch nur annähernd repräsentativ aufgezeichnet worden, sodass wir auch dessen Natur nicht kennen.

Skalenfreiheit ist auch nur eine von vielen Eigenschaften eines Netzes, die es zu erforschen lohnt. Eine andere ist die maximale Weglänge (der »Durchmesser«). Gemeint ist die Anzahl der Schritte (von einem Knoten zum nächsten entlang einer direkten Verbindung), mit denen man von einem beliebigen Knoten des Netzes zu jedem beliebigen anderen kommt (Kasten links).

## Erdős-Zahlen der Mathematiker

Da Paul Erdős eine so ungewöhnlich große Nabe im Netz der Mathematiker war, haben sich seine Fachkollegen einen Spaß daraus gemacht, für jeden unter ihnen die »Erdős-Zahl« zu definieren: Das ist die Anzahl von Schritten, mit der man von dem entsprechenden Menschen zu Erdős kommt (eine Verbindung zwischen zwei Knoten besteht immer dann, wenn beide gemeinsam eine wissenschaftliche Arbeit veröffentlicht haben). Die meisten Mathematiker haben erstaunlich kleine Erdős-Zahlen.

Bei manchen Netzen sind die Voraussetzungen für die Skalenfreiheit nicht erfüllt, insbesondere die Hypothese, dass es nur von der bereits erreichten Größe (Verbindungsanzahl) eines Knotens abhänge, wie attraktiv er für neue Verbindungen ist, und im Übrigen die Verbindungen nach dem Zufallsprinzip geknüpft würden. So sind etwa bei einem Autobahnnetz nicht alle Verbindungen im Prinzip gleich. Vielmehr sind Autobahnen zwischen geografisch weit entfernten Punkten sehr viel teurer als solche zwischen Nachbarstädten, weswegen in der Regel nur die Letzteren wirklich gebaut werden.

Oder die Knoten sind nicht alle gleich: Im Nahrungsnetz sind manche Beutetiere leichter zu fangen als andere und damit häufiger Ziel von Verbindungen. Der Fuchs wählt den Hasen zum Ziel seiner Aktivität, weil er ihn fangen kann und nicht etwa, weil der Hase schon bei anderen Raubtieren als Nahrung so beliebt ist. In sozialen Netzen gibt es Verbindungen verschiedener Qualität, sodass sich Krankheiten und Gerüchte viel schneller innerhalb einer Familie ausbreiten als unter flüchtig Bekannten. Es kommt auch vor, dass Verbindungen einander beeinflussen, etwa wenn durch einen Stau auf der (echten oder Daten-)Autobahn die Ausweichrouten überfüllt werden und dort der Verkehr ebenfalls zusammenbricht.

Für die Zukunft bietet die abstrakte Theorie eine Grundlage, auf der sich solche Abweichungen von der reinen Lehre mit Aussicht auf Erfolg studieren lassen. Hinzu kommt die häufig komplizierte und schwer durchschaubare Dynamik in solchen Netzen, deren Struktur mittlerweile recht gut verstanden ist. ◁

**AUTOREN UND LITERATURHINWEISE**



**Albert-László Barabási** (Bild) ist Professor für Physik an der Universität von Notre Dame (Indiana). Er erforscht das Verhalten einer Vielzahl komplexer Systeme, vom Internet über ein klatschendes Konzertpublikum bis zu Insektenkolonien und Sandhaufen. **Eric Bonabeau** ist leitender Wissenschaftler bei Icosystem, einer Beratungsfirma in Cambridge (Massachusetts), die Methoden der Komplexitätstheorie für das Geschäftsleben nutzt. Er ist einer der Autoren von »Virtuelle Ameisen als Software-Agenten« (Spektrum der Wissenschaft 5/2000, S. 72).

Ein Netz guter Beziehungen. Von Thilo Körkel in: Spektrum der Wissenschaft, März 2003, S. 12

Evolution of networks: from biological nets to the internet and WWW. Von J.F.F. Mendes und Sergei N. Dorogovtsev. Oxford University Press, 2003

All the world's a net. Von David Cohen in: New Scientist, Bd. 174, Nr. 2338 (13. April 2003), S. 24

Statistical mechanics of complex networks. Von Réka Albert und Albert-László Barabási in: Reviews of Modern Physics, Bd. 74, S. 47 (2002)

Linked: The new science of networks. Von Albert-László Barabási. Perseus Publishing, 2002

# Warum gähnen wir?

Gähnen kommt aus dem Stammhirn und tritt schon bei Reptilien auf. Doch nur Menschen lassen sich davon anstecken. So stimmen sie sich unwillkürlich aufeinander ein.

Von Olivier Walusinski

Alle tun es: Menschen, Affen, Hunde, Vögel, sogar Schlangen. Offenbar ist Gähnen ein altes Verhaltenserbe der Wirbeltiere. Nur – wozu ist es gut, den Mund weit aufzureißen und geräuschvoll, langsam und genüsslich tief ein- und auszuatmen, vielleicht noch mit einem herzhaften Seufzer am Schluss?

Charles Darwin (1809–1882), der Begründer der Evolutionstheorie, soll das Gähnen als ein »nutzloses Stück Physiologie« bezeichnet haben. Verwunderlich nur, dass die merkwürdige Verhaltensweise über Jahrmillionen unverändert blieb und bei allen Tieren gleich und auffallend stereotyp aussieht. Merkwürdig auch, dass sie in ganz verschiedenen Zusammenhängen und sogar entgegengesetzten Situationen erscheint: beim Einschlafen und beim Aufwachen, vor und nach einer Mahlzeit, wenn jemand allein ist oder in Gesellschaft. Beim Menschen kommt noch als Besonderheit hinzu, dass Gähnen auf andere leicht ansteckend wirkt.

Für besonders herzhafte Fälle gibt es im Französischen die Wendung: »Gähnen, dass man sich den Kiefer ausrenkt.« Der Spruch ist nicht so falsch. Am häufigsten geraten Kiefer tatsächlich aus dieser Ursache aus dem Gelenk.

Im Prinzip vollführen wir beim Gähnen automatisch einen festen Bewegungsablauf, den wir wenig beeinflussen können. Der Vorgang erinnert damit an einen Reflex. Man gähnt unwillkürlich.

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

Hat man erst angefangen, lässt sich zwar das Ausmaß etwas steuern, der Ablauf aber nicht mehr anhalten oder unterdrücken.

So ein Gähnvorgang dauert fünf bis zehn Sekunden. Zunächst spannen sich das Zwerchfell sowie etliche Muskeln von Kiefer und Nacken an, andere werden gedehnt. Das erzeugt das tiefe Einatmen. Der Mund öffnet sich dabei weit und die Lippen werden zurückgezogen, sodass die Zähne zu sehen sind. Auch die oberen Atemwege weiten sich. Auf dem Höhepunkt hat unser Schlund den vierfachen Durchmesser wie sonst.

### Nicht wegen Sauerstoffmangel

So viel Luft auf einmal kann man nur durch den Mund einholen. Auch Pferde beispielsweise, die an sich immer durch die Nase atmen, gähnen durch das Maul. Währenddessen hört man kurzfristig etwas schlechter, weil sich ein Verbindungsgang zwischen Ohr und Mundraum schließt. Die Augen gehen halb zu, zuweilen kommt eine Träne. Zum herzhaften Gähnen gehört auch, Rumpf und Glieder kräftig zu strecken und das Kreuz durchzudrücken. Auch Tiere überstrecken den Rücken, oder sie machen einen Buckel.

Das Ausatmen geschieht nach kurzem Anhalten der Luft schneller, passiv und oft mit charakteristischen Lauten. Jetzt erschlaffen die vorher kontrahierten Muskeln, der Mund geht wieder zu und die Augen auf.

Lange glaubten Mediziner, das Gähnen diene der besseren Sauerstoffversorgung des Gehirns. Doch das haben Messungen widerlegt: Im Blut steigt dabei weder die Sauerstoffkonzentration mehr als sonst beim Einatmen noch sinkt der Kohlendioxidlevel übermäßig. Doch die Wissenschaft hat andere Erklärungen für den lange viel zu wenig beachteten Verhaltensablauf gefunden.

Einigen Aufschluss über den eigentlichen Sinn des Gähnens geben schon die Situationen, in denen es normalerweise auftritt. Wie viel ein Mensch im normalen Tagesablauf gähnt, ist individuell verschieden, ähnlich wie manche Leute viel, andere wenig schlafen. Die Frequenz ändert sich überdies mit dem Alter – wohl auch im Zusammenhang mit der Schlafdauer. Während Kinder im ersten Lebensjahr sicher fünfundzwanzig bis dreißig Mal am Tag auf die Art Luft schnappen, tun es ältere Personen im Allgemeinen höchstens noch etwa zehn Mal.

Besonders oft gähnen wir des Morgens beim Aufwachen, wobei wir uns gleichzeitig räkeln, und dann wieder vor dem Einschlafen. Das Verhalten überkommt uns des Weiteren unter Schlafmangel, aber auch bei Langeweile, wenn sich eine Situation monoton dahinzieht und unsere Aufmerksamkeit schwindet, etwa bei Fließbandarbeit, auf einer langen, eintönigen Autofahrt oder während eines einschläfernden Vortrags. Ist es heiß oder fühlt man sich räumlich beengt, wird es noch schlimmer.

Unabhängig von langweiligen Situationen ähnelt der Tagesrhythmus des Gähnens bei Tieren dem des Menschen. Wie leicht zu erkennen ist, tritt das Verhalten auf, wenn sich der Grad von Wachheit und Aufmerksamkeit verschiebt. Genauere Untersuchungen ergeben, dass Gähnen uns wie auch den Tieren dabei hilft, wach und konzentriert zu werden beziehungsweise es zu bleiben. Bei Müdigkeit am Abend soll es eigentlich bewirken, dass wir nicht – zumindest nicht auf der Stelle – einschlafen. Allerdings gewinnt dann die Schlafbereitschaft meist die Oberhand.

In diesem Zusammenhang ist die Wirkung bestimmter Neurohormone, der Orexine, interessant. Die Orexine, oder Hypokretine, wurden erst 1998 entdeckt. Unter anderem beteiligen sie sich an der Regulation von Schlafen und Wachsein. Sie entstehen im Hypothalamus, der für die Regulation des Stoffwechselgleichgewichts verantwortlich ist. Dort werden sie im Hungerzentrum ausgeschüttet. Sie stacheln den Appetit an, senken aber zugleich den Energieverbrauch. Wie die Gruppe von Ikuko Sato-Suzuki von der Toho-Universität in Tokio herausfand, gähnen Ratten mehr, nachdem ihnen Orexine in den Paraventrikular-Kern des Hypothalamus injiziert wurde. Zugleich stieg ihre Wachheit.

### Steigende Gähnfrequenz vor der Fütterung

An Tieren kann man gut beobachten, dass sie in gespannter Erwartung und vor wichtigen Ereignissen, die im Prinzip für sie überlebenswichtig sind, vermehrt gähnen. Bemerkenswert oft tritt das im Zusammenhang mit dem Fressen auf. Die Fütterung im Zoo zu festen Zeiten ist hierfür ein gutes Beispiel. Nicht nur bei Löwen steigt davor die Gähnfrequenz klar an. Auch etwa Mandrills – eine Pavianart aus dem Regenwald – befleißigen sich dessen, wenn sie auf den Wärter warten. In der Wildnis gähnen Löwen auffallend viel, bevor das Rudel zur Jagd loszieht. Hyänen tun desgleichen, wenn sie einen Kadaver umkreisen, den sie sich aneignen möchten. Offenbar wirkt hier die Aussicht, den Hunger zu stillen, förderlich – was nicht verhindert, dass ein voller Bauch auch wieder Anlass zum Gähnen gibt.

In den 1980er Jahren haben Forscher Ratten daran gewöhnt, dass sie nur einmal täglich zu fester Stunde gefüttert wurden. Nach drei Wochen gähnten die ▷

◀ **Gähnen ist ein uraltes Verhalten der Wirbeltiere. Mag es hier auch anders scheinen: Erst beim Menschen wirkt Gähnen ansteckend.**




**Der 23 Wochen alte Fetus gähnt schon im Mutterleib. Das Verhalten beginnt bereits nach dem dritten Schwangerschaftsmonat. Es entwickelt sich neurologisch in engem Zusammenhang mit dem Saugen.**

▷ Nager in der Stunde vor dem Schmaus bis zu zehnmal öfter als während des übrigen Tages. Die Häufung verschwand nach dreitägigem Fasten wieder.

Übrigens schlafen und dösen die Pflanzenfresser unter den Säugetieren, etwa die Huftiere, im Allgemeinen nicht nur weniger als die Raubtiere – wohl weil sie viel mehr Zeit für Fressen und Futtersuche aufbringen müssen –, sondern sie gähnen offensichtlich auch deutlich seltener.

Wie Experimente ergaben, steigern sich sowohl die Ruhephasen als auch die Häufigkeit des Gähnens, wenn man ihnen nährstoffreicheres Futter gibt. Dieser Effekt ist tatsächlich von der Höhe der Kalorienzufuhr abhängig. Die einzige Ausnahme von dieser Regel scheinen Früchte fressende Affen zu sein.

Auch soziale Kontakte und Stress können Gähnen auslösen, sogar schon bei niederen Wirbeltieren. Den Juwelen-Riffbarsch *(Microspathodon chrysurus)* kann man ärgern, indem man die Attrappe eines Artgenossen vor ihm schwimmen lässt. Dann verharrt der recht aggressive Fisch mit gespreizten Flossen auf der Stelle, öffnet das Maul und gähnt mehrere Male regelrecht, indem er Wasser aufnimmt. Danach schwimmt er noch minutenlang nervös hin und her. Genauso verhält er sich, wenn man das Hypophysenhormon ACTH ins Wasser gibt, welches die Nebenniere anregt, das Stresshormon Cortisol auszuschütten.

Stimmungsabhängiges Gähnen ist insbesondere von Säugetieren gut bekannt. Generell zeigen es dann, beispielsweise bei Nagern und bei Affen, die Männchen mehr als die Weibchen. So beobachtete der Verhaltensforscher Bertrand Deputte von der Universität Rennes (Frankreich) bei einer Makakengruppe, dass das dominante Männchen am meisten von allen gähnte. Diese Art zu gähnen steht nach Auffassung des französischen Ethologen manchmal am Ende von sozialen Interaktionen mit emotionaler Bedeutung.

Offenbar ist dieser Geschlechtsunterschied vom männlichen Hormon Testosteron abhängig. Er beginnt sich in der Pubertät zu zeigen, in der die männlichen Affen zugleich längere Eckzähne bekommen. Wird ein Männchen kastriert, verschwindet dieses Gähnen. Injiziert man ihm dann männliche Hormone, erscheint das Verhalten wieder. Entgegen anderer Verlautbarungen handelt es sich niemals um ein Drohsignal, wenn ein Affenmännchen seine mächtigen Eckzähne entblößt. Vielmehr scheint das oberste Männchen so seinen Status zu demonstrieren. In unserer eigenen Evolution gingen diese Funktionen offenbar verloren. Warum allerdings bei unserer Art Männer nicht öfter gähnen als Frauen, ist nicht klar.

## Gähnen trotz vollständiger Lähmung

Vieles weist darauf hin, dass das Gähnen von sehr alten Gehirnstrukturen herrührt. Ein besonderes neuronales Zentrum, das diese Erscheinung hervorbringt, haben Hirnforscher bisher zwar nicht gefunden. Doch auf jeden Fall nehmen der Hypothalamus – vor allem der schon erwähnte Paraventrikular-Kern *(Nucleus paraventricularis)* – darauf Einfluss, des Weiteren das Riechhirn sowie die Brücke, ein Bereich des Stammhirns, der mit der Hirnrinde und mit dem Rückenmark in enger Verbindung steht.

Beim menschlichen Fetus tritt der Bewegungsablauf etwa im vierten Schwangerschaftsmonat auf (siehe Bilder links). Die früheste Beobachtung stammt von einem 15 Wochen alten Fetus. In diesem Alter, wenn sich der Hirnstamm ausdifferenziert und die Hypophyse (Hirnanhangsdrüse) zu arbeiten anfängt, vermag das Kind auch zu saugen und zu schlucken. Gähnen und Saugen haben den gleichen neuronalen Ursprung.

Kinder, deren Gehirn sich nicht ausgebildet hat, leben nach der Geburt nur wenige Stunden. Aber sie gähnen und strecken sich. Das tun erstaunlicherweise auch vollständig gelähmte Menschen, obwohl sie sonst zu keiner Bewegung mehr fähig sind und auch wissentlich den Mund nie öffnen könnten. Sogar Patienten mit einem so genannten Locked-in-Syndrom, die sich in keiner Weise mehr mitteilen können, gähnen.

Vor einigen Jahrzehnten entwarf Paul D. MacLean vom Amerikanischen Institut für geistige Gesundheit in Bethesda (Maryland) die These vom Dreifachhirn (dreieinigen Gehirn) des Menschen. Nach diesem groben Schema setzt sich unser Gehirn aus drei unterschiedlich alten Grundtypen zusammen, die sich übereinander schichten und hierarchisch aufeinander aufbauen.

Das älteste, innerste, nannte MacLean »Reptilienhirn«. Zu ihm gehören der Hirnstamm (auch als Stammhirn be-

## IN KÜRZE

### Die drei Gründe zu gähnen

▶ Gähnen ist ein uraltes Verhalten, das unserem Stammhirn entspringt. Es lässt sich nicht unterdrücken und erinnert insofern an einen Reflex. Es dient nicht der besseren Sauerstoffversorgung! Vielmehr sorgt es für die **Aktivierung von Muskulatur und Kreislauf**.

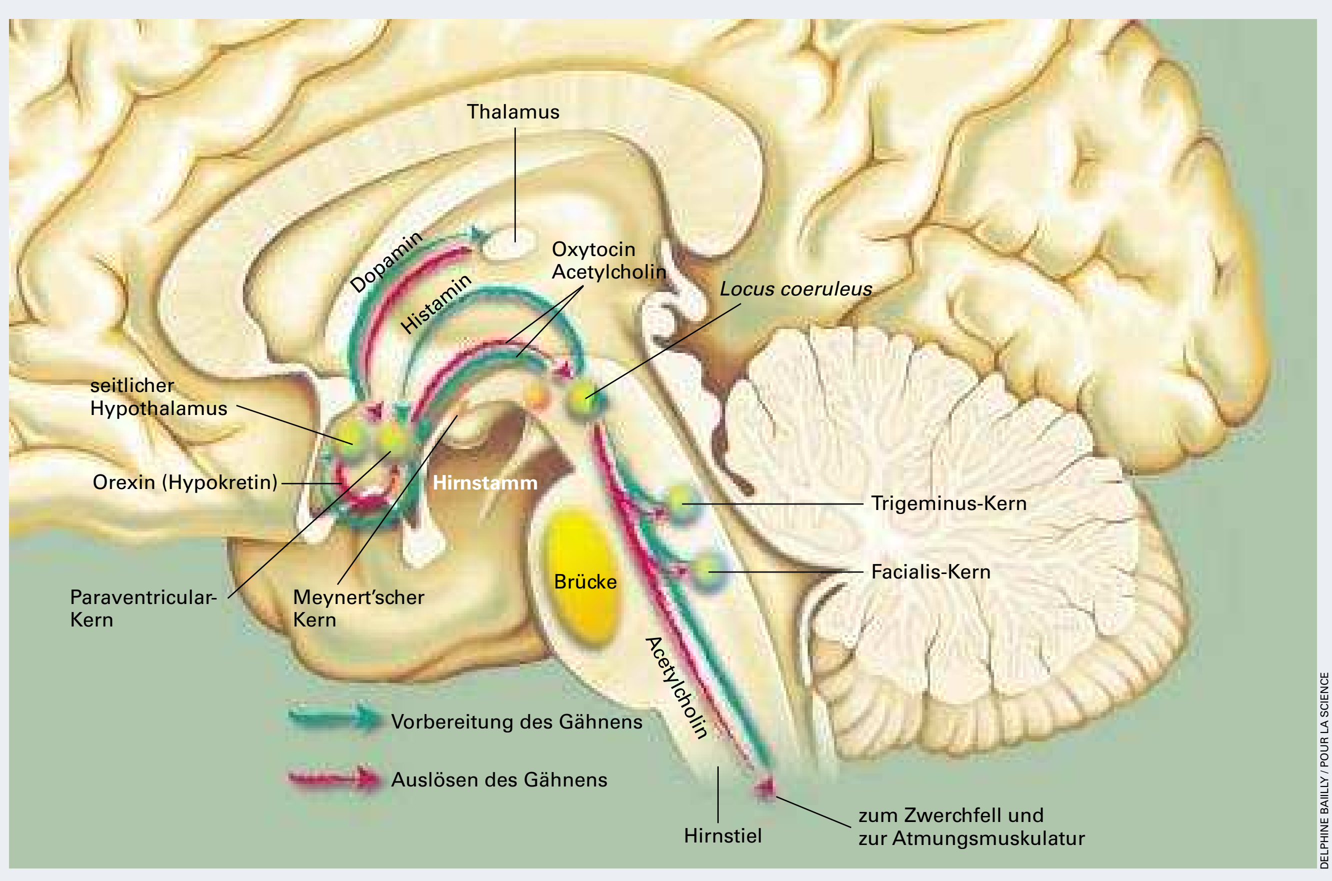
▶ Auch einige **Stimmungen** lösen Gähnen aus: Langeweile, gespannte Erwartung (zum Beispiel einer Mahlzeit), Konflikt. Hierbei tritt das alte Säugerhirn mit dem limbischen System in Funktion.

▶ Nur Menschen gähnen durch **Ansteckung**. Dieser Impuls entsteht im Neusäugerhirn unter Mitwirkung von Nervenzellen, die auch bei Empathie, Einfühlung in andere, aktiv sind. Diese Art des Gähnens dürfte in der menschlichen Evolution geholfen haben, das Gruppenleben zu synchronisieren.

## Der Ort des Gähnens

### Ein Mechanismus aus unserem alten »Reptilienhirn«

**Das Schema zeigt** einige der beim Gähnen beteiligten Vorgänge und die hauptsächlich mitwirkenden neuronalen Botenstoffe. So sinkt etwa bei Müdigkeit – oder Langeweile – die Muskelspannung. Kiefer- und Nackenmuskulatur werden schlaff. Das aktiviert einen Gegenreflex: Die beiden wichtigsten für die Gesichtsmuskulatur zuständigen Hirnnerven, der Trigeminus und der Facialis, befehlen die Kontraktion dieser Muskeln. Davon erfahren andere Gehirngebiete, die den Gähnvorgang mitgestalten. Außerdem wird der *Locus coeruleus* informiert, der beim Aufwachen mitwirkt. Er gibt dem Paraventricular-Kern und dem Thalamus Nachricht. Der zentrale Botenstoff ist Dopamin. Er regt die Ausschüttung von Oxytocin an, das wiederum Acetylcholin aktiviert.




zeichnet) und die Basalkerne. In diesen Bereichen entstehen grundlegende angeborene Verhaltensäußerungen. Auch das Gähnen als Gesamtkomplex hat hier seinen Ursprung.

Über dem Reptilienhirn lagert das »Altsäugerhirn«, das Gefühle reguliert und Bereitschaften steuert, in etwa gleichzusetzen mit dem limbischen System, einer Errungenschaft der Säugetiere. Hier dürfte das emotional bedingte Gähnen etwa von dominanten Affenmännchen ausgelöst werden.

Das jüngste der drei Gehirne ist das »Neusäugerhirn«, das den Neocortex, die Neurinde, bildet, also den größten Teil der Großhirnrinde. Besonders das Stirnhirn gewinnt hiermit an Bedeutung. Die höheren Hirnstrukturen sind zuständig, wenn wir uns vom Gähnen anderer Leute anstecken lassen.

### Entzugssyndrom bei Heroinsucht

Für die grundlegende Beteiligung des Stammhirns an dem Verhaltensautomatismus gibt es sehr viele Beobachtungen, besonders aus dem medizinischen Bereich. Manche Medikamente oder Drogen stimulieren das Gähnen, andere unterdrücken es völlig. Unter Morphium etwa setzt das Verhalten aus. Bei Heroinsüchtigen kommen Gähnattacken als Entzugserscheinung vor. Auch Neuroleptika blockieren den Automatismus. Dagegen macht Histamin nicht nur wach, sondern löst auch Gähnen aus.

Wie schon gesagt, ist die herzhafte Äußerung mit der Regelung von Wach- und Schlafzuständen wie auch des Appetits verbunden. Schlafen und Wachen beruhen auf dem Zusammenspiel von einem guten Dutzend tief sitzender neuronaler Schaltkreise unter Mitwirkung einer Hand voll neuronaler Botenstoffe.

Die gleichen Botenstoffe steuern auch das Gähnen. Einige wirken dabei offenbar eher aktivierend, andere hemmend. So erklärt sich, wieso manche Gehirnmedikamente, die solche Botenstoffe beeinflussen, wiederholtes Gähnen auslösen, andere hingegen das Verhalten völlig unterdrücken. Stimuliert man etwa mit einem injizierten Wirkstoff die Freigabe von Dopamin, löst das ganze ▷

Gähnsalven aus. Das Gegenteil tritt auf, wenn man die Freigabe unterdrückt, was auch durch Neuroleptika geschieht.

Dass manche Tiermütter nach einer Geburt gähnen, geht auf Dopamin und Histamin zurück. Die beiden Substanzen regen Neuronen des Paraventrikular-Kerns an, das Hormon Oxytocin auszuschütten. Unter anderem sorgt dieses Peptid für den Milchfluss. Das »Liebeshormon« fördert aber auch das Knüpfen fester sozialer Bindungen. Ohne Oxytocin würde eine Kuh nicht ihr eben geborenes Kalb lecken und die Nachgeburt fressen – Voraussetzungen dafür, dass sie ihr Junges annimmt. Dabei gähnt sie immer wieder. Versuche mit Ratten zeigten zudem, dass auch die Gabe von Oxytocin selbst Gähnen auslöst.

Ein anderer für Wachzustände wichtiger Botenstoff ist Acetylcholin. Bei Ratten wurde nachgewiesen, dass dessen Konzentrationsschwankungen über den Tag, wie auch die von Dopamin, nicht nur mit dem Wachheitsgrad zusammenhängen, sondern auch mit der Gähnhäufigkeit korrelieren. Serotonin nimmt ebenfalls auf das Gähnen Einfluss. Gleiches gilt für die körpereigenen und von außen zugeführten Opiate.

Zusammengenommen scheint Dopamin als Auslöser besonders wichtig zu sein. Dieser Botenstoff veranlasst, dass der Paraventrikular-Kern des Hypothalamus Oxytocin ausschüttet. Das wiederum aktiviert Acetylcholin, das im Meynert'schen Kern wirkt. Die anderen Botenstoffe modulieren die Reaktion.

### Gähnreflex als Muntermacher

Die enge Beziehung zwischen Schlafen und Gähnen kommt sicherlich über das vegetative (autonome) Nervensystem zu Stande, das grundlegende physiologische Funktionen wie Atmung, Herzschlagfrequenz, Blutdruck und Verdauung steuert. Dabei arbeiten das sympathische und parasympathische System als Gegenspieler. Ersteres ist für Aktivität, Letzteres für Ruhe zuständig.

Im Schlaf übernimmt das parasympathische System die Führung. In dem Zusammenhang senkt Acetylcholin den Blutdruck und verlangsamt den Herzschlag. Am stärksten sind die Muskeln in den Traumphasen entspannt, obwohl das Gehirn währenddessen hochaktiv ist. Auch die oberen Atemwege sind dann völlig schlaff und eng.

Nach dem Aufwachen sorgt das Gähnen dafür, dass die Atemwege wieder weit werden, die Muskeln ihre Leistungsbereitschaft wiedergewinnen sowie Herzschlag und Blutdruck steigen. Bei Müdigkeit wie auch Langeweile dagegen sinkt der Muskeltonus. Insbesondere Nacken- und Kaumuskeln werden schlaff. Dies löst den Reflex aus, sie gefälligst anzuspannen – nämlich zu gähnen. Die Nachricht geht gleichzeitig zum *Locus coeruleus* (siehe Bild S. 73), der dann die Wachheit erhöht.

Nach einem französischen Sprichwort steckt ein guter Gähner sieben Leute an. Besser gesagt lassen sie sich unwillkürlich mitreißen. Das aber ist eine Spezialität des Menschen. Die Löwen auf dem Eingangsfoto gähnen aus einem anderen Grund gleichzeitig. Vielleicht erwarten sie Futter. Niemals würden sie in dieser Weise das Maul aufreißen, weil sie gerade einen Artgenossen gähnen gesehen haben. Beim Menschen jedoch funktioniert die Übertragung ohne jede Absicht weder des Vorgähners noch des Einfallenden. Wer sich allerdings gerade konzentriert beschäftigt, ist vor Ansteckung ziemlich sicher.

Ende der 1980er Jahre hat der Psychologe Robert Provine von der Universität von Maryland in Baltimore dieses menschliche Phänomen genauer untersucht. Unter anderem zeigte er Testpersonen einen Film mit dreißig Gähnsequenzen. Etwas mehr als die Hälfte der Teilnehmer folgte dem Beispiel, manche schon nach wenigen Sekunden, andere bis zu fünf Minuten später. Dagegen ließ sich niemand von gähnenden Zeichentrickgesichtern mitreißen.

Hingegen sind manche Menschen so anfällig, dass schon die reine Beschreibung, ja der Gedanke an den Ablauf ge-

## Gähnanfälle als Krankheitszeichen

### Wenn ein Verhalten zur Qual wird

**Am 23. Oktober 1888** stellte der bekannte Arzt Jean-Martin Charcot seinen Fachkollegen eine junge Frau vor, die ununterbrochen gähnte. Über 400-mal in der Stunde riss sie, solange sie wach war, tief einatmend den Mund auf und schien das nicht verhindern zu können. Erst der Schlaf brachte Erlösung.

Charcot diagnostizierte Hysterie. Nach den berichteten Begleitsymptomen zu urteilen handelte es sich allerdings um die Auswirkungen eines Hirntumors in der Hirnanhangsdrüse. Heute weiß man, dass unmäßiges Gähnen unter anderem bei Gefäßschäden und bei Epilepsie auftreten kann. Häufigste Ursache ist die Einnahme von Antidepressiva. Des Weiteren kann das Verhalten auf Unterzucker oder auf eine Allgemeinerkrankung hindeuten. Bei vielen Migränepatienten kündigt sich so eine Attacke oder deren Ende an. Umgekehrt verschwindet die Erscheinung bei Parkinsonpatienten nahezu völlig, tritt bei erfolgreicher Behandlung aber wieder auf.



**Diese junge Frau litt vermutlich an einem Tumor. Pro Minute musste sie zwanghaft etwa siebenmal gähnen – alle acht Sekunden.**




nügt. Und doch: Sahen diese hypersensiblen Leute von einem gähnenden Gesicht nur einen Teil, und sei es der Mund, regte sich bei ihnen nichts. Dabei muss man das Gähnen nicht einmal sehen, um davon angesteckt zu werden, denn auch Blinde reagieren, wenn sie jemanden genüsslich gähnen hören.

**Schizophrene lassen sich nicht anstecken**

Kürzlich hat Steven Platek von der Drexel University in Philadelphia (Pennsylvania) untersucht, worin sich ansteckbare und unempfängliche Menschen unterscheiden. Wie er herausfand, fallen jene Menschen am besten ein, die in hohem Grade empathiefähig sind, das heißt allgemein stark mit anderen mitfühlen und sich in deren Situation hineinversetzen können. Sie spüren das Befinden des Mitmenschen auch besonders leicht an dessen Gesichtsausdruck. Menschen mit schizophrenen Zügen sind gewöhnlich nicht ansteckbar.

Einfühlungsvermögen erfordert, viele Informationen zu analysieren und zu bewerten, und ist damit eine Leistung höherer kognitiver Funktionen. Mitgähnen geschieht aber automatisch, eher unbewusst. Es wirkt wie eine empathische Äußerung, die einen allerdings instinktiv, unfreiwillig überkommt. Über diesen Mechanismus erfassen Menschen offenbar unwillkürlich das Befinden von anderen, in dem Fall wohl deren Wachheitsgrad. Der Sinn scheint zu sein, dass unterschiedliche Personen so ihren Aktivitätszustand aufeinander abstimmen. Man könnte es eine affektive Kommunikationsform nennen, die nicht auf bewusster Ebene abläuft.

Welche Gehirnfunktionen beim Mitgähnen des Menschen arbeiten, beginnt sich erst langsam zu erhellen. Auf jeden Fall scheint die Hirnrinde beteiligt zu sein. Offenbar sind die so genannten Spiegelneuronen einbezogen, die Vittorio Gallese und Giacomo Rizzolatti von der Universität Parma 1996 bei Makaken entdeckten. Es handelt sich um eine Neuronengruppe in der Großhirnrinde, und zwar im prämotorischen Cortex.

Das Besondere dieser Nervenzellen ist, dass sie nicht nur dann aktiv werden, wenn der Affe eine bestimmte Aktion ausführt, etwa ein Objekt ergreift, sondern auch, wenn er jemandem bei der gleichen Handlung zusieht. Das muss kein Artgenosse, es kann auch ein Mensch sein. Entsprechende Neuronen besitzen auch wir. Anscheinend machen wir die beobachtete Handlung sozusagen im Geiste mit. Möglicherweise sind diese Spiegelneuronen unter anderem auch für unser Empathievermögen wichtig.

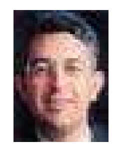
Im Jahr 2002 beobachtete Jean Decety von der Universität des US-Staates Washington in Seattle, welche Hirnregionen beim Menschen aktiv sind, wenn die Versuchsperson eine vorgeführte Bewegung nachmacht – oder wenn sie zusieht, wie umgekehrt jemand anders sie imitiert. Dabei kam heraus, dass beim Imitieren und beim Beobachten von nachgeahmtem Verhalten im Stirn- und Schläfenlappen die gleichen Regionen anspringen – neben den für die Bewegungsausführung selbst zuständigen Gebieten. Es gibt hier eine Art von gemeinsamer Kodierung für eigene und bei anderen beobachtete Handlungen.

Auch wenn Gähnen ansteckt, arbeiten diese Spiegelneuronen, wie Riitta Hari von der Universität Helsinki im Sommer 2003 nachwies. Sahen Testpersonen einen Film mit gähnenden Leuten, war ein Bereich der oberen Schläfenfurche aktiv, der zu diesem Hirnsystem gehört. Dieselben Neuronen blieben stumm, wenn die Testteilnehmer andere Gesichtsausdrücke vorgeführt bekamen.

Interessant dabei ist, dass diese Neuronen sozusagen mitschwingen, auch wenn der Zuschauende dann gar nicht gähnt. Im Stirnhirn ist ein Hemmmechanismus lokalisiert, der die Reaktion unterbindet. Das gilt für nachahmendes Verhalten generell. Bei manchen Hirndefekten funktioniert die Hemmung nicht mehr. Diese Menschen imitieren zwanghaft die Gesten anderer – oder auch deren sprachliche Äußerungen.

Sich vom Gähnen anstecken zu lassen, dürfte eine besondere Art des Nachahmens sein, die erst in der Evolution des Menschen entstand. Sie geschieht zwar unwillentlich, doch das Verhalten benutzt – wie Bewegungen überhaupt – Imitationsneuronen der Hirnrinde. In dem speziellen Fall tritt der Hemmmechanismus allerdings nicht dazwischen. Vielleicht half diese besondere Form von automatischer Stimmungsübertragung den Hominiden, ihre Gruppenaktivitäten zu synchronisieren, ohne das Bewusstsein bemühen zu müssen. ◁

**AUTOR UND LITERATURHINWEISE**



**Olivier Walusinski** ist Mediziner und lebt südlich von Paris.

Contagious yawning: the role of self-awareness and mental state attribution. Von Steven M. Platek et al. in: Cognitive Brain Research, Bd. 17, S. 223, 2003

Imiter pour decouvrir l'humain. Von Jean Decety und Jacqueline Nadel. Presses Universitaires de France, 2002

Le baillement: de l'éthologie à la médicine clinique. Von Olivier Walusinski und Bertrand L. Deputte in: La Revue du Praticien, Bd. 18, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

TRANSSOLAR ENERGIETECHNIK

# Prima Klima im Glashaus

Nicht nur Segelflieger, sondern auch Klimatechniker verstehen es, Wind und Aufwind zu nutzen.

Von Roland Wengenmayr

Moderne Großbauten beeindrucken oft durch ihre ausgedehnten Glasfassaden, doch ohne aufwändige Klimamaßnahmen würden die Innenräume an sonnigen Tagen zu heiß werden, im Winter hingegen auskühlen. Auch die Abwärme von Menschen wird bei entsprechend hohem Publikumsverkehr ein nicht zu unterschätzender Faktor; hinzu kommt die Energieabgabe technischer Geräte. In konventionellen Hochhäusern belegen deshalb Klimaanlagen ungefähr jedes zwanzigste Stockwerk und in allen anderen verbergen sich Raum fressende Luftkanäle über abgehängten Decken. Diese Klimatechnik verschlingt Geld und Energie, darüber hinaus bereitet sie manchem Mitarbeiter gesundheitliche Beschwerden.

Eine moderne Architektur hingegen sollte Wärme- und Kältequellen in der Umwelt sowie eine Reihe physikalischer Effekte so geschickt nutzen, dass sie bereits eine gute Grundklimatisierung erreicht. Zusätzliche Maschinen erledigen nur die Feinarbeit und fangen Spitzenlasten ab. Diese Geräte können dann viel kleiner und sparsamer ausgelegt werden. Eine solche alternative Konstruktion ist allerdings eine enorme technische Herausforderung, denn sie muss zuverlässig zu jeder Jahreszeit in Hunderten von Räumen angenehme Bedingungen schaffen. Deshalb arbeiten Architekten eng mit Klimaexperten zusammen.

Die Transsolar Energietechnik GmbH mit Hauptsitz in Stuttgart ist ein solcher Partner. Ihre 24 Ingenieure und Physiker gehören zu den Pionieren einer nachhaltigen Klimatechnik. Der Ingenieur Matthias Schuler und einige Forschungskollegen gründeten das junge Unternehmen 1992 aus der Universität Stuttgart heraus – damals mit dem Ziel, Solarenergie in die Häuser zu bringen. Sonnenkollektoren spielen heute bei Transsolar zwar nur noch eine Nebenrolle, aber die Sonne selbst ist nach wie vor ein wichtiger Faktor der Klimakonzepte. Nach gut zehn Jahren kann Transsolar eine beeindruckende Liste von Referenzprojekten vorweisen. Sie reicht vom Mercedes-Museum in Stuttgart bis zum neuen internationalen Flughafen von Bangkok, dessen klimatisierte Hallen und Gänge jährlich dreißig Millionen Besucher bewältigen. Stararchitekten wie Helmut Jahn oder Frank O. Gehry arbeiten regelmäßig mit den Stuttgartern zusammen, und Schuler lehrt mittlerweile als Gastprofessor an der renommierten Harvard University in Cambridge (Massachusetts).



ANJA THIERFELDER, STUTTGART

◀ Im neuen Post-Verwaltungsgebäude in Bonn realisierten die Ingenieure erstmals eine dezentrale Klimaanlage. Zwischen den beiden gegeneinander versetzten Halbkreissegmenten befinden sich mehrgeschossige »Skygärten«, die beim Wärmeabtransport eine wichtige Funktion übernehmen.

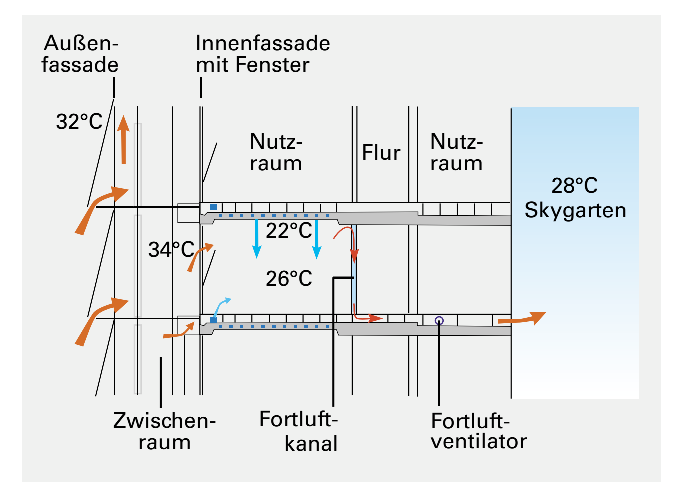
»Wenn wir mit an Bord sind, werden alle energetischen Aspekte schon beim ersten Entwurf berücksichtigt«, erklärt Thomas Lechner, einer der Teilhaber und Professor für Bauphysik an der Fachhochschule Kaiserslautern. Dabei ist jeder Großbau ein Unikat mit einer eigenen Funktionsweise und Ästhetik. Glasfassade, Dach, Atrien und Treppenhäuser, Büros, Konferenzräume, Kantinen und Keller werden zu Elementen einer architektonischen Klimaanlage. Sie soll die Luft auf angenehme Temperaturen und Feuchtewerte konditionieren und ohne unangenehmen Zug effektiv umwälzen.

## Wohlfühltemperatur kontra Energieverbrauch

Schon während der ersten Planungsphase setzen die Stuttgarter Ingenieure aufwändige Computermodelle ein. Ihre Software simuliert das Innenklima bei Tag und Nacht, bei jedem Wetter und zu allen Jahreszeiten. Sie berücksichtigt die bauphysikalischen Eigenschaften der Fenster, Wände und Decken und sogar das Verhalten der Menschen im Gebäude, soweit es das Klima beeinflusst. Je schlechter beispielsweise die Architekten das Tageslicht ausnutzen, desto stärkere Leuchtmittel werden benötigt, desto öfter schaltet man sie ein. So kann künstliches Licht bei ungeschickter Planung zu einer bedeutenden Wärmequelle werden.

Das Resultat der Modellrechnungen sind Grafiken, die zeigen, wie die Luft durch die Räume strömt und dabei abkühlt oder wärmer wird. An ihnen können die Klimaingenieure auch beobachten, welche Temperaturen Decken und Wände annehmen, ein wichtiger Faktor für die »gefühlte Temperatur« und damit für das Wohlbefinden der Menschen.

Bei sehr großen Bauprojekten betreten die Ingenieure oft technisches Neuland und Computersimulationen alleine reichen nicht mehr aus. In solchen Fällen baut Transsolar reale Modelle des Hauses oder seiner kritischen Teile und testet sie bei verschiedenen Wetterbedingungen. Wenn erforderlich, errichten die Ingenieure sogar ein 1:1-Modell eines kompletten Büros mit Glasfassadenausschnitt und lassen es einige Monate von Messgeräten »bewohnen«.




**Der Querschnitt durch ein Geschoss des Post Towers zeigt den Weg der Zuluft durch die Doppelfassaden in die Büros (rote Pfeile). Von dort zieht sie als Abluft über die Flure in die Skygärten, die sie als Kamine aus dem Turm befördern. Wasserleitungen in den Betondecken kühlen im Sommer zusätzlich die Räume (blaue Pfeile), im Winter fließt warmes Wasser hindurch.**



ANJA THIERFELDER, STUTTGART / GRAFIK LINKS: TRANSSOLAR ENERGIETECHNIK / SIGANIM

**Die Zuluft tritt durch geregelte Klappen zunächst in einen Raum zwischen den Glasfassaden.**

Der neue Post Tower in Bonn zeigt, was modernes Klima-Engineering kann. Das Architekturbüro Murphy/Jahn in Chicago entwarf das neue Verwaltungsgebäude der Deutschen Post, und die Stuttgarter durften erstmals bei einem über 160 Meter hohen Haus mit 41 Geschossen alle Register ziehen. Das Ergebnis fasst Lechner trocken so zusammen: »Es ist das erste Hochhaus mit dezentraler Belüftung.«

Statt einer zentralen Klimaanlage mit riesigen Zu- und Abluftschächten setzten die Ingenieure auf den Wind, der fast immer um ein so hohes, allein stehendes Gebäude weht, sowie auf den Kamineffekt, der Warmluft im Hausinneren aufsteigen lässt. Hinzu kamen »aktivierte« Betondecken: In dünnen Wasserleitungen strömt im Sommer kühlendes Grundwasser aus zwei Brunnen unterhalb des Hochhauses, im Winter geheiztes Wasser.

Der architektonische Entwurf kam diesem Belüftungskonzept entgegen. Im Grundriss besteht der Turm aus zwei leicht gegeneinander verschobenen Kreisstücken und einem verbindenden Übergangsbereich. Dieser beherbergt auf der Eingangshalle fünf so genannte Skygärten, vier davon reichen jeweils über neun Stockwerke, der oberste ist dem Vorstand des Unternehmens vorbehalten und zwei Geschosse hoch. Diese Skygärten bilden den Kamin, in dem erwärmte Abluft aus den Büros aufsteigt und dann seitlich den Turm verlässt.

Wind drückt Frischluft durch viele tausend Öffnungen in das Haus. Um diesen Antrieb auch bei extremem Wetter zu nutzen, ist die Außenfassade doppelt ausgelegt, die Luft strömt durch Belüftungsklappen also zuerst in einen Zwischenraum. Diese Klappen werden je nach Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperatur geöffnet oder geschlossen, auch ihr Winkel wird geregelt.

## Kühlen wie im Orient

Anders als bei den meisten Bürohochhäusern haben die Räume des Post Towers Fenster, die sich öffnen lassen, um das Klima individuell einzustellen. Ansonsten strömt die Luft durch »Unterflurkonvektoren« weiter in den Turm. Das sind kleine, ebenfalls individuell einstellbare Klimageräte. Kanäle leiten die Luft weiter in den angrenzenden Flur, Lüftungsschlitze schließlich in einen Skygarten.

Im Normalfall sorgen allein der Winddruck und der Kamineffekt für eine gute Zirkulation im Gesamtsystem. An durchschnittlich dreißig Tagen im Jahr erfordern Windstille bei gleichzeitig zu geringem Temperaturunterschied zwischen außen und innen zusätzliche Ventilatoren, die in den Fortluftkanälen sitzen. Es galt natürlich auch die entgegengesetzte Situation einzuplanen: Könnte extremer Druckunterschied zwischen Luv- und Leeseite etwa bei einem Herbststurm voll in das Innere des Gebäudes durchschlagen, dann würde sich manche Bürotür nicht mehr öffnen lassen und Schreibtische würden leer gefegt. Doch stattdessen laufen sich diese Strömungen im Zwischenraum der Fassade tot, werden durch Zuluftklappen und Lüftungsschlitze gedämpft.

Trotz des aufwändigen Konzepts kam es den Bauherrn billiger als eine konventionelle Klimaanlage, denn er gewann etwa 15 Prozent an Gebäudevolumen hinzu. Allerdings fließt ein Teil der eingesparten Kosten in die Regelungstechnik. Seit Mitte 2003 wird der Post Tower täglich von bis zu 2000 Menschen genutzt, die Klimatisierung funktioniert zuverlässig. »In traditionellen arabischen Häusern kühlt der Kamineffekt seit Jahrtausenden sechzig auf vierzig Grad Celsius herunter«, erklärt Thomas Lechner. »Wir versuchen lediglich, mit modernsten Mitteln fünfundzwanzig Grad zu erreichen.« ◁

Der Physiker **Roland Wengenmayr** arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist und Redakteur von »Physik in unserer Zeit«.

# Der raffinierte Code des Lebens

Nach jüngsten Erkenntnissen ist die Natur ein genialer Programmierer. Das Codierungssystem für die Aminosäuren im Erbgut erweist sich als so geschickt konzipiert, dass es katastrophalen Fehlern vorbeugt und zugleich die Evolution beschleunigt.

Von Stephen J. Freeland und Laurence D. Hurst

Am 14. April 2003 erklärte das Konsortium des Humangenom-Projekts das menschliche Erbgut für vollständig sequenziert: Der genetische Bauplan des Menschen, eine Abfolge von insgesamt 3 Milliarden DNA-Bausteinen, war entziffert. Die neue Herausforderung besteht nun darin, für jedes der entdeckten 30 000 bis 40 000 mutmaßlichen Gene herauszufinden, welche genaue Funktion es hat und wann es auf welche Weise aktiviert wird. Nicht ohne Grund sprach Francis S. Collins, der Leiter des Humangenom-Projekts, deshalb nur vom »Ende des Anfangs«.

Er spielte dabei auf ein Ereignis an, das sich in der gleichen Woche zum fünfzigsten Mal jährte: den Anfang des Anfangs, als es James D. Watson und Francis H. Crick gelang, die Doppelhelixstruktur der DNA aufzuklären. Damit war jenes Molekül entschlüsselt, das nichts weniger als das Geheimnis des Lebens birgt. In ihm speichern die Organismen ihren eigenen Bauplan als hochverdichtete Datenfolge und erschaffen daraus in jeder Generation von neuem die komplexen Komponenten und Stoffwechselwege eines lebenden Wesens.

Nachdem die Struktur der DNA aufgeklärt war, beschäftigten sich die Biologen vorrangig mit der Frage, wie die Erbinformation darin verschlüsselt ist. Man wusste schon, dass das genetische Alphabet nur vier Buchstaben hat: die so genannten Basen. Die üblichen Proteine bestehen jedoch aus zwanzig verschiedenen Aminosäuren. Folglich ist es nicht möglich, die Buchstabenfolge der Doppelhelix eins zu eins in die Aminosäuresequenz eines Proteins zu übersetzen; sie muss vielmehr nach bestimmten Regeln decodiert werden. Alle Lebensäußerungen – vom Schlüpfen eines Kükens über das Keimen von Samenkörnern bis zur Zellteilung der Bakterien – erfordern die Entschlüsselung von DNA-Sequenzen.

Da die biochemische Maschinerie, die das leistet, in den 1950er Jahren noch kaum erforscht war, rückte man dem genetischen Code zunächst mit mathematischen Überlegungen zu Leibe. Einige der frühen Hypothesen zur Entschlüsselung waren höchst einfallsreich und faszinie-

**Gruppen aus drei DNA- oder RNA-»Buchstaben« – so genannte Codons – bestimmen, welche Aminosäure an einer bestimmten Stelle in ein Protein eingebaut wird.**

SLIM FILMS

ren daher noch heute, obwohl sie sich letztlich als falsch erwiesen. Als der Code in den 1960er Jahren dann geknackt wurde, wirkte das Ergebnis eher enttäuschend; denn die Lösung, welche die Natur gefunden hatte, erschien weniger elegant als einige theoretische Vorschläge.

Erst in den letzten Jahren zeigte sich, welche Raffinesse in Wahrheit dahinter steckt. Es wurde klar, weshalb gerade dieser Code sich durchgesetzt hat und wie er 3 Milliarden Jahre strenger Prüfung durch die unerbittliche Maschinerie der natürlichen Auslese überstand. Heute steht fest, dass er darauf ausgerichtet ist, die Evolution zu beschleunigen und zugleich katastrophale Auswirkungen von Mutationen zu vermeiden. Indem wir seinen Ursprung ergründen, schauen wir aber nicht nur zurück in die Anfänge des Lebens, sondern erschließen auch der biologischen Forschung in der vor uns liegenden »postgenomischen« Ära viel versprechende neue Wege.

### Alphabet mit vier Buchstaben

Die Begriffe »Code« und »Entschlüsselung« sind in diesem Zusammenhang durchaus wörtlich zu nehmen. Genetische Informationen werden in Form der Nucleinsäuren DNA und RNA gespeichert, die beide aus sehr ähnlichen biochemischen Bausteinen, den Nucleotiden, aufgebaut sind. Die Zellen und Gewebe des lebenden Körpers bestehen dagegen vorwiegend aus den chemisch völlig andersartigen Proteinen. Diese regeln als Enzyme auch den Stoffwechsel. Wenn ein Gen also eine Nucleotidsequenz ist, die ein Protein beschreibt, dann muss diese Beschreibung erst von einer »Sprache« in eine völlig andere übersetzt werden – ähnlich der Übertragung einer Morsebotschaft ins Deutsche.

Die Entdeckung der Doppelhelix machte deutlich, dass das Buch des Lebens mit vier Buchstaben auskommt: den Nucleotidbasen Adenin, Cytosin, Guanin und Thymin (A, C, G und T). Das Proteinalphabet hingegen umfasst zwanzig verschiedene Aminosäuren. Somit sind Kombinationen aus mehreren Nucleotiden erforderlich, um eine Aminosäure zu bezeichnen. Mit zwei Basen lassen sich maximal sechzehn verschiedene Wörter (Codons) bilden. Tripletts erlauben dagegen 64 Kombinationen – mehr als genug für zwanzig Aminosäuren.

Tatsächlich sind Gene, wie wir heute wissen, lange Abfolgen von Codons aus ▷

▷ jeweils drei Buchstaben, die über mehrere Zwischenschritte in Aminosäuresequenzen übersetzt werden. Zunächst entstehen RNA-Kopien der DNA-Vorlage – mit denselben Basen, außer dass Thymin (T) durch Uracil (U) ersetzt ist. Die Ribosomen, die Eiweißfabriken der Zelle, lesen die Sequenz dieser so genannten Boten-RNAs (mRNAs) dann triplettweise ab. Transfer-RNAs (tRNAs) mit komplementären »Anticodon«-Tripletts liefern die Aminosäure, die an den wachsenden Proteinstrang angehängt wird.

All das war in den frühen 1950er Jahren aber noch nicht bekannt, sodass sich die Codierung zunächst als rein informationstheoretisches Problem darstellte. Den ersten Lösungsvorschlag präsentierte denn auch kein Biologe, sondern der Physiker George Gamow, besser bekannt als Begründer der Urknalltheorie. Sein 1954 publizierter geometrischer Code verknüpfte die kombinatorische Beziehung zwischen zwanzig Aminosäuren und vier Nucleotiden elegant mit der chemischen Struktur der DNA.

**Viele Biologen sahen im genetischen Code nur das Ergebnis eines Zufalls**

### Geniale, aber falsche Hypothesen

Wie Gamow erkannte, enthält die DNA-Doppelhelix rautenförmige Hohlräume, die an vier Seiten von Basen begrenzt werden und gerade so groß sind, dass die Seitenketten der Aminosäuren hineinpassen. Lineare Anordnungen solcher Hohlräume könnten damit als Schablone für den Zusammenbau eines Proteins dienen, wobei die Aminosäure in einer bestimmten Raute von der Kombination der Basen an deren vier Ecken abhängt. Gamow ignorierte jeweils eine Ecke, weil sie komplementär zur gegenüberliegenden und somit durch diese festgelegt war, und ordnete die 64 möglichen Triplett-Codons in chemisch verwandte Familien, deren Mitglieder alle dieselbe Aminosäure verschlüsseln sollten.

Da ein und dieselbe Base stets in drei benachbarten Rauten vorkommt, die sich Kanten oder Ecken teilen, überlappen sich die Codons. Als Folge davon können auf einem bestimmten DNA-Stück drei verschiedene Proteine verschlüsselt sein – je nachdem, bei welchem Hohlraum die Übersetzung anfängt. Wegen dieser äußerst kompakten Form der Informationsspeicherung, bei der die Bedeutung vom Leseraster abhängt, stand Gamows Hypothese damals bei den Code-Theoretikern hoch im Kurs. Allerdings bringt die Überlappung auch eine Einschränkung mit sich: Es gibt Aminosäuresequenzen, die sich beim besten Willen nicht codieren lassen. Zum Unglück für Gamow wurden schon nach kurzer Zeit Proteine mit Sequenzen entdeckt, die weder mit seinem System noch mit irgendeinem anderen überlappenden Code darstellbar sind.

Zudem mehrten sich die Hinweise darauf, dass DNA und Aminosäuren bei der Eiweißsynthese nicht in direkten Kontakt zueinander treten. Crick entwickelte deshalb 1957 ein Modell mit »Adaptermolekülen« als Vermittlern. Sie sollten nur zwanzig sinnvolle Codons erkennen, die für jeweils eine Aminosäure standen, während alle übrigen 44 Tripletts als unsinnig galten. Cricks Code war demnach nicht überlappend, sondern »kommafrei«: Er brauchte keine Kommas oder Trennzeichen (oder kurze Pausen wie beim Morse-Alphabet), um anzuzeigen, welche drei Basen auf dem DNA-Strang jeweils ein Codon bilden; falsche Kombinationen blieben für die Adapter ganz einfach unsichtbar, sodass diese sich automatisch im korrekten Leseraster anlagerten. Die Aminosäuren an ihrem entgegengesetzten Ende wurden dann laut Modell zum Protein verknüpft.

## IN KÜRZE


▶ Im Erbgut sind die zwanzig Aminosäuren, aus denen gewöhnliche Proteine bestehen, durch »Wörter aus drei Buchstaben« (**Codons**) verschlüsselt. Anfangs erschien der Code rein zufällig entstanden. Neuere Erkenntnisse zeigen jedoch, dass er im Verlauf der Evolution optimiert wurde.

▶ Den Beweis dafür lieferten **Computersimulationen**. Sie ergaben, dass Mutationen und Lesefehler beim natürlichen Code viel weniger Schaden anrichten als bei der großen Mehrzahl künstlicher Alternativen.

## Das Verschlüsselungssystem der Natur

**Bezeichnet man ein Gen** – ein DNA-Stück mit dem Bauplan für ein Protein – als »Satz«, dann besteht dieser aus dreibuchstabigen »Wörtern« (Codons), von denen jedes eine der zwanzig Aminosäuren oder ein »Stopp«-Signal verschlüsselt. Der Weg vom Gen zum Protein beginnt mit der Transkription. Dabei werden von dem DNA-Stück kurzlebige RNA-Kopien angefertigt. Deren Bausteine sind Basen, die man mit den Buchstaben A, C, G und U benennt. Im zweiten Schritt – der Translation – übersetzt die Proteinsynthesemaschinerie diese Buchstabenfolge in die Aminosäuresequenz des auf dem Gen verschlüsselten Proteins. Schon in den 1960er Jahren wurde die Bedeutung der einzelnen Codons enträtselt (siehe Tabelle). Die Raffinesse des Verschlüsselungssystems insgesamt zeigte sich jedoch erst kürzlich in vollem Umfang.

### Synonyme Codons und Ähnlichkeiten der Aminosäuren

Viele der 64 möglichen Wörter aus je drei Buchstaben bezeichnen dieselbe Aminosäure, sodass sich die meisten Proteine durch verschiedene DNA-Sequenzen verschlüsseln lassen. Die synonymen Codons unterscheiden sich meist nur in einem einzelnen Buchstaben, in der Regel dem letzten. Dadurch entstehen Blocks mit ähnlich lautenden Wörtern. Auch Codons für Aminosäuren mit ähnlicher Affinität zu Wasser differieren meist nur im letzten Buchstaben. Aminosäuren, deren Codons mit demselben Buchstaben beginnen, sind dagegen oft Produkte des gleichen Synthesewegs. Diese Besonderheiten haben, wie sich nun erwies, essenzielle Bedeutung für das langfristige Überleben aller Organismen und beschleunigen vermutlich die Evolution.

| Base an Position 1 | Base an Position 2: U | C | A | G |
|---|---|---|---|---|
| U | UUU Phenylalanin | UCU Serin | UAU Tyrosin | UGU Cystein |
| | UUC Phenylalanin | UCC Serin | UAC Tyrosin | UGC Cystein |
| | UUA Leucin | UCA Serin | UAA STOPP | UGA STOPP |
| | UUG Leucin | UCG Serin | UAG STOPP | UGG Tryptophan |
| C | CUU Leucin | CCU Prolin | CAU Histidin | CGU Arginin |
| | CUC Leucin | CCC Prolin | CAC Histidin | CGC Arginin |
| | CUA Leucin | CCA Prolin | CAA Glutamin | CGA Arginin |
| | CUG Leucin | CCG Prolin | CAG Glutamin | CGG Arginin |
| A | AUU Isoleucin | ACU Threonin | AAU Asparagin | AGU Serin |
| | AUC Isoleucin | ACC Threonin | AAC Asparagin | AGC Serin |
| | AUA Isoleucin | ACA Threonin | AAA Lysin | AGA Arginin |
| | AUG Methionin | ACG Threonin | AAG Lysin | AGG Arginin |
| G | GUU Valin | GCU Alanin | GAU Aspartat | GGU Glycin |
| | GUC Valin | GCC Alanin | GAC Aspartat | GGC Glycin |
| | GUA Valin | GCA Alanin | GAA Glutamat | GGA Glycin |
| | GUG Valin | GCG Alanin | GAG Glutamat | GGG Glycin |

LUCY READING

Das Konzept der kommafreien Codierung erschien so klar und einfach, dass es bald allgemeine Zustimmung fand – bis neue experimentelle Daten auch diese geniale Hypothese widerlegten. In den frühen 1960er Jahren ließ sich nämlich zeigen, dass künstliche RNAs, die gemäß Cricks Modell ausschließlich aus unsinnigen Wörtern bestehen, in Zellhomogenaten eine Proteinsynthese in Gang setzen.

Im Jahre 1965 war der genetische Code dann endlich geknackt – nicht durch eine grandiose Idee, sondern ganz unspektakulär durch schlichtes, geduldiges Experimentieren. Numerologisch betrachtet wirkte er keineswegs elegant. Puristen störte vor allem, dass einige Codewörter redundant sind: Zwei, vier oder sogar sechs von ihnen bezeichnen manchmal dieselbe Aminosäure. Nach den enthusiastischen Spekulationen der vorangegangenen Jahre erschien das von der Natur realisierte System daher vielen Wissenschaftlern als wahllos zusammengestückelt – das Ergebnis blinden Zufalls.

Wie sich in der Folge herausstellte, arbeitet die Proteinsynthese selbst bei Organismen, die so verschieden sind wie Menschen und Bakterien, nach denselben Regeln. Offenbar hat sich der genetische Code in Milliarden von Jahren nicht verändert – seit der Zeit, als primitive Vorläuferzellen begannen, sich in die drei Organismenreiche (Archaea, Bakterien und Eukaryoten) aufzuspalten. Crick prägte daher 1968 das plastische Bild vom »eingefrorenen Zufall«. Es schien so einleuchtend, dass es jahrzehntelang das Denken der Genetiker beherrschte. »Die Zuordnung von Codons zu Aminosäuren geschah anfangs völlig zufällig«, schrieb Crick, doch nachdem das Verschlüsselungssystem einmal festgelegt war, sei es ein so grundlegender Bestandteil des Lebens gewesen, dass jede Veränderung katastrophale Folgen gehabt hätte.

Nach Darwins Theorie der natürlichen Auslese sind geringfügige Abwandlungen einzelner Gene vorteilhaft, wenn sie die Anpassung ihres Trägers an seine Umwelt verbessern. Bei einer Änderung der Codierungsregeln träten jedoch an zahllosen Stellen des Genoms gleichzeitig Mutationen auf, was schwere Funktionsstörungen zur Folge hätte. Der Unterschied entspräche dem zwischen einem Druckfehler und der kompletten Neuverteilung der Buchstaben auf der Tastatur einer Schreibmaschine.

### Rätselhafte Abweichungen vom Standardcode

Ganz so einfach liegen die Dinge dennoch nicht, wie sich seither gezeigt hat. Zwar verwenden die meisten Organismen tatsächlich den Standardcode, doch kennen die Genetiker inzwischen mindestens sechzehn Varianten, bei denen einzelne Codons abweichende Bedeutungen haben. Sie finden sich verstreut auf ganz verschiedenen Ästen im Stammbaum des Lebens. Auch bei den Varianten stehen drei Basen für eine Aminosäure, aber die Zuordnung divergiert. Während zum Beispiel fast alle Lebewesen das Codon »CUG« in die Aminosäure Leucin übersetzen, interpretieren es einige Arten der Pilzgattung *Candida* als Befehl zum Einbau von Serin. Die Mitochondrien – die »Kraftwerke« aller eukaryotischen Zellen – haben ihr eigenes ▷




Genom, und auch bei ihnen weicht die Bedeutung einzelner Codewörter vom Standard ab. Zum Beispiel stehen im mitochondrialen Genom der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* vier der sechs Tripletts, die üblicherweise Leucin bedeuten, für Threonin.

Die Entdeckung einer Reihe solcher Varianten in den 1990er Jahren machte deutlich, dass der genetische Code durchaus nicht eingefroren und für alle Ewigkeit fixiert ist. Offenbar kann er sich verändern, und folglich hat er es wohl auch getan. Der Standardcode, der sich vor Urzeiten entwickelte und über Milliarden Jahre erhalten blieb, ist demnach kein Zufall – im Gegenteil: Er wurde darauf optimiert, die Auswirkungen biochemischer Zufälle zu minimieren.

Bei jedem Verschlüsselungssystem ist mit Übertragungsfehlern zu rechnen, doch sind nicht alle gleich schädlich. In den meisten Sprachen besteht zum Beispiel ein fundamentaler Unterschied zwischen Konsonanten und Vokalen. Vertauscht man im Deutschen etwa »s« und »a«, iat dieaer Astz achwer zu veratehen. Die Konsonanten »s« und »z« hingegen klingen recht ähnlich, zodazz diezer Zats trotsdem einigermazen verztändlich izt. Fehleranfällige Systeme sollten demnach so programmiert sein, dass die Auswirkungen unvermeidlicher Irrtümer möglichst gering bleiben.

**Da der genetische Code sich verändern kann, war wohl auch er Gegenstand der Evolution**

In lebenden Organismen können unterschiedliche Codefehler auftreten. Gelegentlich verändert sich die DNA-Sequenz des Gens selbst, indem zum Beispiel beim Kopieren eine Base verwechselt wird. Man spricht dann von einer Mutation. In anderen Fällen lagert sich an die mRNA-Kopie des Gens der falsche Adapter (die falsche tRNA) an. Dadurch wird eine falsche Aminosäure in das gerade entstehende Proteinmolekül eingebaut (Kasten rechts).

Selbst als der genetische Code noch als Zufallsprodukt galt, bemerkten einige Wissenschaftler bereits seine hohe Fehlertoleranz. Schon 1965 beobachtete Carl R. Woese, damals an der Universität von Illinois, dass Codons, die sich nur in einer Base unterscheiden, ähnliche Aminosäuren spezifizieren. Deshalb wirkt sich ein Fehler bei der Übersetzung nicht allzu stark auf die Struktur des Proteins aus.

Aber was bedeutet »ähnlich« in diesem Fall? Schließlich unterscheiden sich die zwanzig Aminosäuren gleich in mehreren Eigenschaften, angefangen vom Molekulargewicht über die räumliche Struktur bis hin zur elektrischen Ladung. Woese bemerkte, dass Codons mit zwei identischen Basen in der Regel Aminosäuren verschlüsseln, die in gleichem Maße hydrophob (wasserscheu) sind.

Dieses Merkmal ist für die Funktion eines Proteins von entscheidender Bedeutung. Bei der Proteinsynthese faltet sich die neu entstehende Aminosäurekette nämlich in ihre charakteristische dreidimensionale Form. Die aber hängt davon ab, wie die hydrophoben Aminosäuren verteilt sind. Als wasserscheue Bausteine wenden sie sich nämlich vom wässrigen Zellplasma ab und schließen sich zusammen, während die hydrophilen (wasserfreundlichen) Kettenglieder nach außen gedrängt werden.

Beim Austausch einer einzelnen Base ist die fälschlich eingebaute Aminosäure oft ähnlich hydrophob wie die ursprünglich vorgesehene, sodass sich der Wechsel nur wenig auf die räumliche Struktur des Proteins auswirkt und dessen Funktion mithin kaum beeinträchtigt. Aber wie effizient ist der Code in dieser Hinsicht wirklich? Das wollten wir genau wissen. Deshalb begannen wir 1998, aufbauend auf den früheren Beobachtungen von Woese und anderen Wissenschaftlern, die Frage quantitativ anzugehen.

Zunächst ermittelten wir die Hydrophobiewerte aller zwanzig Aminosäuren. Daraus berechneten wir dann ein Maß für die Fehleranfälligkeit des Codes, indem wir die durchschnittliche Änderung der Hydrophobie bei allen denkbaren Ersetzungen einer einzelnen Base in allen 64 Codons berechneten. Das Ergebnis besagte für sich allein genommen allerdings noch wenig. Aussagekraft konnte ihm nur der Vergleich mit möglichen Alternativen verleihen.

## Test auf Fehlertoleranz

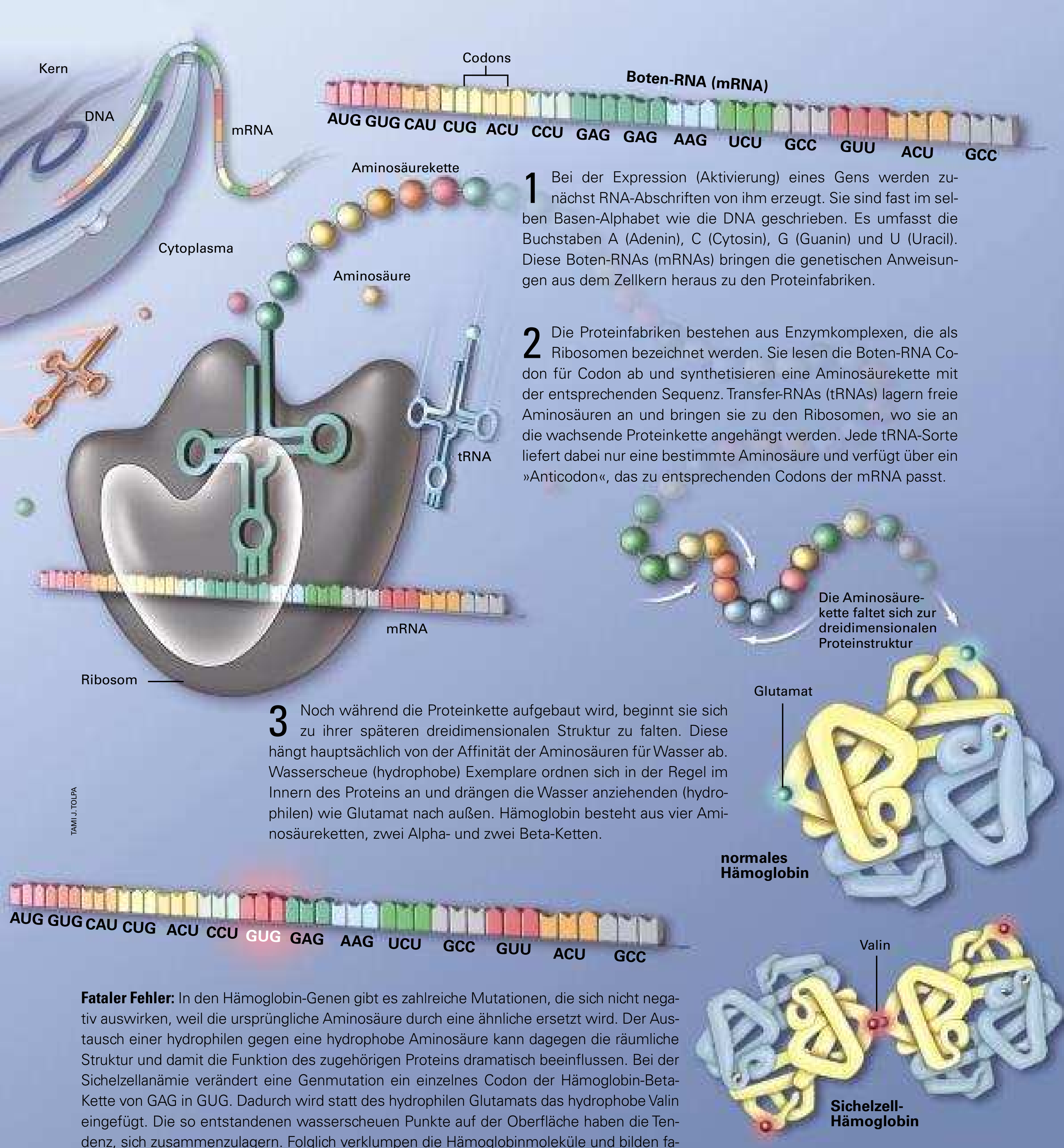
Bevor wir sie konstruierten, machten wir allerdings einige plausible Annahmen über Einschränkungen, denen jeder genetische Code in einer Welt aus DNAs, RNAs und Aminosäuren unterliegt. So betreffen Fehler bei der Translation eines mRNA-Codons in die betreffende Aminosäure meist die dritte Base. Hier haften mRNA und tRNA am schwächsten aneinander. Crick sprach deshalb von der »Wackel-Position«. An ihr unterscheiden sich gewöhnlich die synonymen Codons, welche dieselbe Aminosäure bezeichnen. Ein »Übersetzungsfehler« in dieser Position wirkt sich dann überhaupt nicht auf das Protein aus, weil die Bedeutung beider Codewörter ja dieselbe ist.

Natürlich verringert das bereits die Fehleranfälligkeit des genetischen Codes. Es handelt sich jedoch weniger um eine Optimierung als um die Notwendigkeit, das Wackel-Phänomen auszugleichen. Alternativcodes ohne diese Eigenschaft wären klar benachteiligt; deshalb schlossen wir sie von vorneherein aus. Desgleichen behielten wir Anzahl und Sequenzen der Stopp-Codons bei, da man ihnen ja keine Hydrophobie zuweisen kann.

Mit diesen Vorgaben generierten wir hypothetische Codes, indem wir zunächst einfach die Zuordnung der zwanzig Codonblocks zu den zwanzig Aminosäuren nach dem Zufallsprinzip neu

# Die Fehlertoleranz der Proteinsynthese

**Der genetische Code minimiert die Folgen von Fehlern**, seien es Mutationen in den Genen selbst oder Lesefehler im Verlauf der Proteinsynthese. Die Basensequenz der DNA wird in eine Aminosäuresequenz übersetzt, welche die dreidimensionale Struktur des fertigen Proteins festlegt (1, 2 und 3). Selbst beim Einbau einer falschen Aminosäure sorgt der genetische Code dafür, dass diese meist dem korrekten Molekül ähnelt, weshalb sich an der Gestalt des Proteins wenig ändert. Eine seltene Ausnahme, die eindrucksvoll illustriert, welchen Schaden der Austausch einer einzigen Base anrichten kann, ist die Sichelzellanämie (unten).




**1** Bei der Expression (Aktivierung) eines Gens werden zunächst RNA-Abschriften von ihm erzeugt. Sie sind fast im selben Basen-Alphabet wie die DNA geschrieben. Es umfasst die Buchstaben A (Adenin), C (Cytosin), G (Guanin) und U (Uracil). Diese Boten-RNAs (mRNAs) bringen die genetischen Anweisungen aus dem Zellkern heraus zu den Proteinfabriken.

**2** Die Proteinfabriken bestehen aus Enzymkomplexen, die als Ribosomen bezeichnet werden. Sie lesen die Boten-RNA Codon für Codon ab und synthetisieren eine Aminosäurekette mit der entsprechenden Sequenz. Transfer-RNAs (tRNAs) lagern freie Aminosäuren an und bringen sie zu den Ribosomen, wo sie an die wachsende Proteinkette angehängt werden. Jede tRNA-Sorte liefert dabei nur eine bestimmte Aminosäure und verfügt über ein »Anticodon«, das zu entsprechenden Codons der mRNA passt.

**3** Noch während die Proteinkette aufgebaut wird, beginnt sie sich zu ihrer späteren dreidimensionalen Struktur zu falten. Diese hängt hauptsächlich von der Affinität der Aminosäuren für Wasser ab. Wasserscheue (hydrophobe) Exemplare ordnen sich in der Regel im Innern des Proteins an und drängen die Wasser anziehenden (hydrophilen) wie Glutamat nach außen. Hämoglobin besteht aus vier Aminosäureketten, zwei Alpha- und zwei Beta-Ketten.

**Fataler Fehler:** In den Hämoglobin-Genen gibt es zahlreiche Mutationen, die sich nicht negativ auswirken, weil die ursprüngliche Aminosäure durch eine ähnliche ersetzt wird. Der Austausch einer hydrophilen gegen eine hydrophobe Aminosäure kann dagegen die räumliche Struktur und damit die Funktion des zugehörigen Proteins dramatisch beeinflussen. Bei der Sichelzellanämie verändert eine Genmutation ein einzelnes Codon der Hämoglobin-Beta-Kette von GAG in GUG. Dadurch wird statt des hydrophilen Glutamats das hydrophobe Valin eingefügt. Die so entstandenen wasserscheuen Punkte auf der Oberfläche haben die Tendenz, sich zusammenzulagern. Folglich verklumpen die Hämoglobinmoleküle und bilden faserige Strukturen, sodass sich die roten Blutkörperchen sichelartig verformen (rechts).

▷ verteilten. Selbst dies ergab jedoch schon die enorme Zahl von $2{,}5 \times 10^{18}$ Möglichkeiten (etwa ebenso viele Sekunden sind seit der Entstehung des Universums vergangen). Wir wählten daher lediglich zufällige Stichproben und berechneten deren Fehleranfälligkeit. Das Ergebnis war eindeutig: Nur hundert Codes unter einer Million schnitten genauso gut oder besser ab wie ihr natürliches Gegenstück (Kasten unten).

Die Resultate waren noch erstaunlicher, wenn wir bei der Berechnung der Fehleranfälligkeit zusätzliche Faktoren berücksichtigten, die bekannte Muster von Mutationen und Lesefehlern widerspiegelten. Unter diesen realistischeren Bedingungen erschien der natürliche Code noch um Größenordnungen besser und musste sich nur einem einzigen unter einer Million Alternativcodes geschlagen geben.

Eine so erstaunliche Fehlertoleranz kann kein Zufall sein, sondern spricht klar für eine Optimierung durch evolutionäre Selektion. Möglicherweise gab es einst viele verschiedene Codes, die unterschiedlich robust waren. Organismen mit der höchsten Fehlertoleranz hatten bessere Chancen zu überleben und setzten sich durch. So siegte schließlich der jetzige Standardcode. Für diese Vermutung spricht, dass auch heute noch natürliche Varianten davon existieren.

Kritiker weisen allerdings darauf hin, dass sich der genetische Code mit raffinierten Computerprogrammen noch erheblich verbessern lässt – selbst wenn man unser Kriterium beibehält, wonach sich bei »guten« Codes der Austausch einer Base möglichst wenig auf die Hydrophobie der betreffenden Aminosäure auswirken sollte. Die errechneten Vorhersagen für ein optimales System sind allerdings immer nur so gut wie die Vorgaben der Programmierer, und die meisten »besseren« Versionen beruhen auf stark vereinfachten Annahmen über die Art der Fehlerquellen, die in der Realität auftreten. Zum Beispiel wird das Wackeln ignoriert. Darum kann die Bewertungsfunktion der Optimierungsalgorithmen auch nicht berücksichtigen, welche Vorteile es bringt, die Codewörter in Blocks zu gruppieren, die sich nur in der letzten Base unterscheiden.

Außerdem muss man der Natur zugute halten, dass sie im Gegensatz zu den genannten Computerverfahren ein »blinder Designer« ist. Sie kann sich nur tastend einem Idealzustand nähern, indem sie aus der beschränkten Zahl von Varianten, die in einer gegebenen Generation vorliegen, die beste auswählt. Dabei findet sie nicht unbedingt das globale Optimum.

Dennoch hat die Natur ihre Sache offenbar gut gemacht. Simuliert man nämlich die Besonderheiten der natürlichen Selektion, so zeigt sich, dass nur drei Prozent der hypothetischen Zufallscodes unter Selektionsdruck eine ähnlich hohe Fehlertoleranz entwickeln, wie sie das natürliche Pendant hat.

Als der genetische Code einst entdeckt wurde, schien er vielen Biologen weniger elegant als die theoretischen Entwürfe von Gamow und Crick. Auch heute lassen sich mit Computerhilfe sicher viele mathematisch optimierte Systeme entwickeln. Aber nur zu zeigen, dass es sie gibt, ohne dabei die realen Selektionsbedingungen zu berücksichtigen, beweist kaum etwas und zeugt von wenig Verständnis für die Raffinesse der Evolutionsmechanismen.

## Die Evolution des genetischen Codes

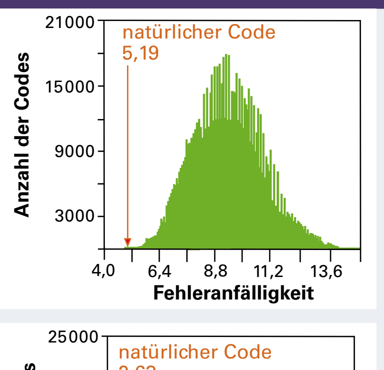
**Mindestens sechzehn Organismen** aus völlig verschiedenen Ästen des Stammbaums verwenden Verschlüsselungen für Aminosäuren, die vom Standardcode abweichen. Zum Beispiel stehen bei vielen Arten der Grünalgengattung *Acetabularia* die Stoppcodons UAG und UAA für Glycin. Bei Hefepilzen der Gattung *Candida* bezeichnet das Codon CUG Serin statt wie üblich Leucin. Solche Varianten zeigen, dass sich der Code verändern kann. Zugleich ermöglichen sie Einblicke in die Mechanismen seiner Evolution.

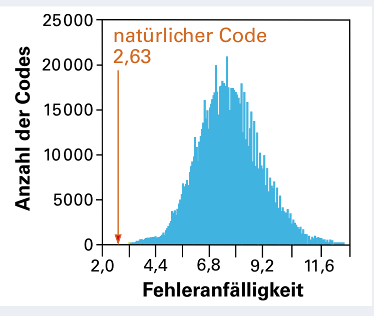
So bauen Vertreter aus allen drei großen Organismenreichen (Archaea, Bakterien und Eukaryoten) dort, wo sich das Stoppcodon UGA befindet, vereinzelt Selenocystein in ihre Proteine ein. Diese seltene Aminosäure entsteht durch chemische Modifikation von Cystein, das bereits an eine tRNA gebunden ist. Desgleichen interpretieren manche Archaea und Bakterien das Stoppcodon UAG als Anweisung zum Anfügen der Aminosäure Pyrrolysin. Diese 22. Aminosäure leitet sich von Lysin ab, das analog zum Selenocystein nach seiner Bindung an die tRNA chemisch verändert wird.

**Dies legt nahe, dass der genetische Code** bei den frühen Lebensformen noch weniger als zwanzig Aminosäuren umfasste. Die komplexeren Moleküle sind oft biochemische Derivate der einfacheren. Zum Beispiel synthetisieren einige Bakterien Glutamin durch Amidierung tRNA-

## Der Code auf dem Prüfstand

**Die schädlichen Konsequenzen** von Mutationen oder Lesefehlern sind am geringsten, wenn dabei eine Aminosäure gegen eine andere mit ähnlicher Hydrophobie (Wasserscheu) ausgetauscht wird. Entsprechend kann man die Fehleranfälligkeit eines Codes als die mittlere Veränderung der Hydrophobie bei allen erdenklichen Ersetzungen einzelner Basen in sämtlichen Tripletts definieren. Bei einer im Computer zufällig erzeugten Stichprobe von einer Million künstlicher Codes reagierten nur hundert weniger empfindlich auf Fehler als der natürliche (oben). Berücksichtigt man, welche Arten von Mutationen und Lesefehlern in der realen Welt am häufigsten vorkommen, hat sogar nur jeder millionste alternative Code eine höhere Fehlertoleranz als der natürliche (unten).




LUCY READING





**Die Meeresalge *Acetabularia* kann fünf Zentimeter hoch wachsen, besteht aber dennoch nur aus einer Zelle – der größten, die man kennt.**

gebundenen Glutamats. Das könnte bedeuten, dass das Aminosäure-Repertoire im Laufe der Evolution durch Abwandlung schon etablierter Proteinbausteine erweitert wurde und die Neulinge von den angestammten Aminosäuren einige tRNAs und zugehörige Codons »kidnappten« – ähnlich wie Organismen mit Abweichungen im Verschlüsselungssystem dem Stoppsignal eine andere Bedeutung verliehen haben. Damit erhebt sich die Frage, wie viele alternative Codes in den Verästelungen des Stammbaums noch versteckt sind und ob der genetische Code überhaupt schon am Ende seiner Entwicklung angelangt ist oder ob er sich auch in Zukunft noch erweitern wird.

Der Standardcode ist nämlich nicht nur ein Produkt der natürlichen Auslese, sondern fungiert auch als eine Art Suchalgorithmus zur Beschleunigung der evolutiven Anpassung an die Umwelt. Das fehlertolerante Design mit Blocks aus Codons, die entweder synonym sind oder biochemisch ähnliche Aminosäuren verschlüsseln, leistet mehr als bloße Schadensbegrenzung. Statistisch gesehen, sind kleinere Veränderungen mit höherer Wahrscheinlichkeit vorteilhaft als große. Indem der genetische Code die Auswirkungen einer jeden Mutation minimiert, maximiert er also zugleich die Chance, dass dabei ein besseres Protein entsteht.

## Aus Fehlern lernen

Das Verständnis der Mechanismen, die den genetischen Code optimiert und dafür gesorgt haben, dass er seinerseits die Evolution beschleunigt, weckt aber nicht nur Bewunderung für die Natur als archaischen Software-Entwickler. Es kann auch dazu beitragen, einige der schwierigsten Probleme der modernen Biologie zu lösen.

Die Masse der Sequenzdaten nach den Bauanleitungen für die zahllosen Proteine eines Lebewesens zu durchforsten zählt zu den wichtigsten aktuellen Aufgaben der Molekularbiologie. Doch die Möglichkeiten dazu sind bisher begrenzt, weil neue Gene nur anhand von Ähnlichkeiten mit bereits bekannten identifiziert werden können. Wenn man aber berücksichtigt, wie sich der genetische Code auf Mutationen auswirkt, kann man auch Gene erkennen, deren Sequenzen sich im Laufe der Evolution sehr weit voneinander entfernt haben, und vielleicht sogar die Funktion ihrer Proteinprodukte ableiten. Vorhersagen über die räumliche Struktur – die Faltung – eines Proteins sind ebenfalls möglich. Dazu muss man nur die Fehlertoleranz des Systems beachten und sich klar machen, wie der Austausch von Basen die Größe, Ladung und Hydrophobie einzelner Aminosäuren beeinflusst.

Das Wissen um Arten mit Abweichungen vom Standardcode kann auch dazu dienen, ein zu erforschendes Gen zu »generalisieren«. Wer heute ein menschliches Gen erforschen will, das zum Beispiel an der Krebsentstehung beteiligt ist, führt es üblicherweise in eine Mikrobe wie das Darmbakterium *Escherichia coli* ein und lässt von diesem das zugehörige Protein synthetisieren. Aber manchmal produziert der Mikroorganismus den Eiweißstoff überhaupt nicht, nur in sehr geringen Mengen oder mit einer leicht veränderten Zusammensetzung.

Nach unseren Erkenntnissen beruht dieses Problem, das die biologische Forschung teils stark beeinträchtigt, in einigen Fällen auf einer unterschiedlichen Präferenz für synonyme Codons. So werden die sechs Codewörter für Arginin bei Bakterien und Säugern nicht gleich häufig benutzt. In menschlichen Genen überwiegen AGA und AGG. *E. coli* dagegen verwendet AGA nur sehr selten und macht bei seiner Translation daher oft Fehler. Kennt man diese Präferenzen, kann man eine Version des Gens konstruieren, die in verschiedenen Organismen gleich verlässlich funktioniert.

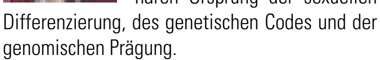
Einer von uns (Freeland) entwickelt mit seinem Team derzeit Programme, die auf der Grundlage der neuen Erkenntnisse über den genetischen Code bei der Genmanipulation, der Suche nach unbekannten Genen und der Vorhersage von Proteinstrukturen helfen sollen. Wir beide untersuchen – ebenso wie etliche andere Forscher – außerdem die Frage, wie der Code eigentlich entstanden ist. Dabei wollen wir verstehen, wie RNAs mit Aminosäuren zu interagieren begannen, wie sich daraus ein formales Verschlüsselungssystem entwickelte und wie sich das biologische Repertoire an Aminosäuren langsam erweiterte.

Auf diese Weise dürften wir auch der Klärung anderer ungelöster Fragen näher kommen. Weshalb gibt es gerade zwanzig Standard-Aminosäuren? Warum existieren für manche Aminosäuren sechs Codons, für andere dagegen nur zwei oder eines? Könnte auch hier die Optimierung der Fehlertoleranz dahinter stecken? Den Code zu knacken war wirklich nur der Anfang zu seinem Verständnis. ◁

**AUTOREN UND LITERATURHINWEISE**



**Stephen J. Freeland** (oben) ist Assistenzprofessor für Bioinformatik an der Universität von Maryland in Baltimore. Er hat an der Universität Cambridge über ein Thema aus der Evolutionstheorie promoviert. Sein Doktorvater **Laurence D. Hurst** ist heute Professor für Evolutionsgenetik an der Universität Bath (Großbritannien). Sein besonderes Interesse gilt dem evolutionären Ursprung der sexuellen Differenzierung, des genetischen Codes und der genomischen Prägung.



Driving change: the evolution of alternative genetic codes. Von M. A. Santos et al. in: Trends in Genetics, Bd. 20, S. 95; Februar 2004

The case for an error-minimizing standard genetic code. Von S. J. Freeland et al. in: Origins of Life and Evolution of the Biosphere, Bd. 33, S. 457; Oktober 2003

On the evolution of primitive genetic codes. Von G. Weberndorfer et al. in: Origins of Life and Evolution of the Biosphere, Bd. 33, S. 491; Oktober 2003

The invention of the genetic code. Von Brian Hayes in: American Scientist, Bd. 86, S. 8; Januar/Februar 1998

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

# Königreich der Viehzüchter

Mal Konkurrent, mal Handelspartner oder Kolonie – stets war das Schicksal Nubiens mit dem Ägyptens verknüpft. Französische Archäologen erkunden jetzt das Leben abseits des Königspalastes.

Um 2500 v. Chr. entstand im heutigen Sudan das erste uns bekannte Königreich Schwarzafrikas. Die Ägypter nannten es zunächst Iam, ab etwa 2000 v. Chr. dann Kusch; als »Kasch« wird es in der Bibel erwähnt. Seit einer Begegnung des griechischen Geografen Strabon mit dem Stamm der Noba vor rund 2000 Jahren aber heißt es Nubien. Das Land erstreckte sich entlang dem Niltal zwischen dem ersten und dem vierten Katarakt – mächtigen Stromschnellen, die natürliche Grenzen bildeten.

Fruchtbare, weite Ebenen ließen Nubien gedeihen. Das Vieh war zahlreich und der Boden barg enorme Schätze: Gold, Kupfer, edle Steine und Granit als Baustoff. Zudem brachte der Handel zusätzlichen Gewinn: Ebenholz, Elfenbein, Felle, Öle und Parfüms aus Schwarzafrika erreichten Ägypten nur auf Wegen, die unter Nubiens Kontrolle standen.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts förderte der amerikanische Archäologe George Reisner erstmals Objekte jener Kultur ans Licht, doch glaubte er sich auf dem Boden einer ägyptischen Kolonie und deutete ihre Herkunft falsch. Erst Grabungen in der einstigen nubischen Hauptstadt Kerma südlich des Dritten Katarakts und auf der etwa hundert Kilometer nördlich gelegenen Nilinsel Saï zeigten, dass die Archäologen einem afrikanischen Reich auf der Spur waren. Seitdem hat ihre Zunft der Vergangenheit viele Geheimnisse entreißen können.

Die nubische Kultur, wie sie sich in Kerma und seiner Umgebung darstellt, wird heute in vier Perioden unterteilt. Entsprechend der engen Verbindung des Königreichs mit dem der Pharaonen, korrespondieren diese Phasen mit Epochen der ägyptischen Chronologie.

### Ein Hüttenpalast im Zentrum der Macht

Das Frühe Kerma (um 2500/2400–2050 v. Chr.) entspricht dem Alten Reich und der Ersten Zwischenzeit in Ägypten; man kennt aus dieser Periode einige Friedhöfe und Siedlungen. Während der Mittleren Kerma-Kultur (etwa 2000–1750 v. Chr.) entwickelte sich ein Königtum, das die Stämme einte. Kerma wurde Hauptstadt und kontrollierte die Handelswege nach Ost- und Zentralafrika. Um sich vor dieser Konkurrenz im Süden zu schützen, später, um mit dem neuen Königreich Handel zu treiben, ließen die Pharaonen des zeitgleichen Mittleren Reichs Befestigungsanlagen, Häfen und Städte am zweiten Katarakt errichten.

Die Klassische Kerma-Kultur (um 1750–1550 v. Chr.) entspricht der Zweiten Zwischenzeit Ägyptens; diese Periode war die erste Blütezeit des nubischen Reichs: Das Königtum beherrschte nun von Kerma aus einen durchorganisierten Staat. Die ägyptischen Befestigungsanlagen in Unternubien wurden erobert und Kerma unterhielt diplomatische Beziehungen mit den Hyksos, den Feinden Ägyptens, die das Nildelta besetzt hatten. Doch mit dem Ende dieser Periode war der Stern Nubiens im Sinken begriffen, bis es sich Jahrhunderte später wieder aufschwang und sogar für kurze Zeit die Herrschaft über das Pharaonenreich erringen konnte (siehe Kasten S. 97).

Grabungen in Kerma spiegeln dessen Bedeutung als Machtzentrum. Vier Hauptstraßen führten von der Peripherie zum Stadtzentrum mit seinem »Palast«, bestehend aus: einem Tempel und einer zeremonielle Hütte für Audienzen, umgeben von kleineren Hütten, die als Palastbauten oder Lager dienten. Mauern, Gräben und Bastionen an den Zugängen schützten die Hauptstadt offenbar gegen Angriffe.

Wie stark die Rolle der Religion, insbesondere die eines Ahnenkults gewesen sein dürfte, verdeutlicht eine kleinere, ebenfalls befestigte Siedlung im Südwesten der Hauptstadt. Entlang den beiden Hauptstraßen standen einst Totenkapellen, um diese herum verschiedene Werkstätten – vermutlich die Infrastruktur eines Totenkults. Vier Kilometer weiter ▷

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*




Kerma war einst die Hauptstadt eines mächtigen Reichs im heutigen Sudan. Die von den Archäologen ausgegrabenen Grundmauern wurden wieder zugeschüttet, um sie für spätere Generationen zu erhalten. Mit Ziegeln hat man die Grundrisse der Stadt nachgebaut.

nach Osten lag die Nekropole der Hauptstadt, sie umfasste Tausende von Grabhügeln. Über den eigentlichen Beisetzungen wurde jeweils solch ein Tumulus aufgeschüttet, der bis zu hundert Meter Durchmesser erreichen konnte. Jeder Verstorbene wurde in eine ovale oder runde Grube gebettet, anfänglich auf einer Lederdecke, in späterer Zeit auf einer Liege.

Die Archäologen fanden zahlreiche Beigaben für das Leben im Jenseits: Geopferte Schafe und Gegenstände aus Bronze, Elfenbein oder Holz, auch Schmuck, Waffen und Keramiken. Mit Beginn des Königtums ab etwa 2000 v. Chr. umgab ein Ring aus kleineren Grabhügeln den eines Hochrangigen. Das bezeugt auf traurige Weise eine ausgeprägte soziale Schichtung – Bedienstete mussten ihren Herrn in den Tod folgen, bei der Bestattung wohl besonders bedeutender Könige starben Hunderte.

## Notgrabungen in der nubischen Provinz

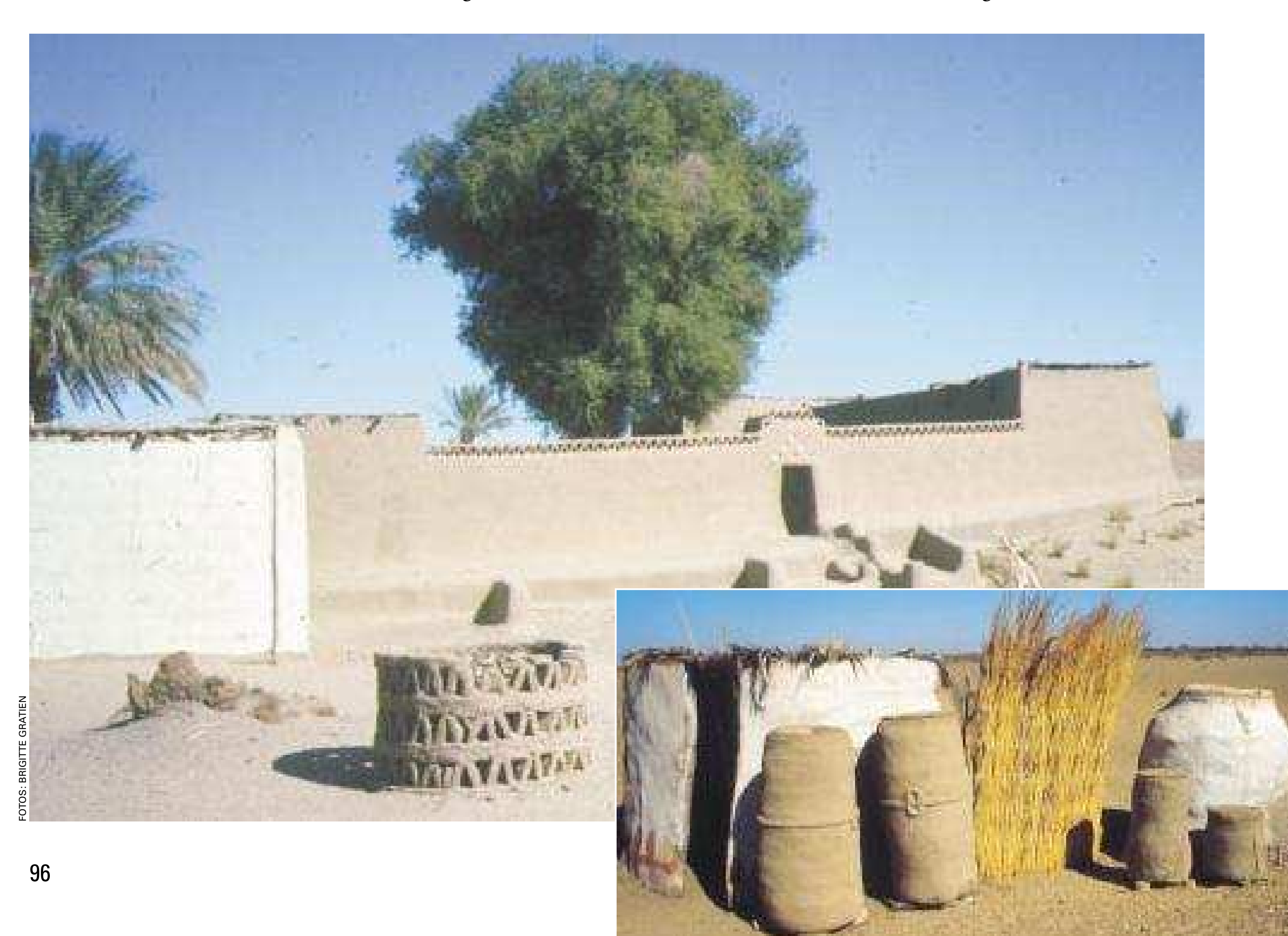
Während die Ruinen der Hauptstadt vergleichsweise gut erhalten sind, wurden benachbarte Siedlungen am Nilufer durch Überschwemmungen und – insbesondere in jüngerer Zeit – durch landwirtschaftliche Nutzung zerstört. Seit 1994 erforschen deshalb Archäologen des französischen Forschungszentrums CNRS unter der Leitung von Brigitte Gratien das Gebiet von Wadi el-Chowi im Bereich des heutigen Dorfes Gism el-Arab, etwas südlich von Kerma. Auch dort soll der Ackerbau wieder aufgenommen werden und archäologische Stätten sind bedroht.

Das Prospektionsgebiet umfasst laut Grabungskonzession 48 Quadratkilometer. Die Forscher haben mittlerweile elf Siedlungsplätze ausgemacht, einige entlang dem Wadi el-Chowi, andere Richtung Westen verteilt. Zwei davon wurden bislang näher erforscht. In beiden Fällen lassen sich die Grenzen der Ortschaften nicht mehr ausmachen, dementsprechend wissen die Archäologen auch nicht, ob es einst schützende Mauern gab.

Das erste Dorf, auf einer kleinen Anhöhe errichtet, war während der gesamten Kermazeit bewohnt. In der Frühen Kultur bestand es aus Rundhütten von etwa vier Meter Durchmesser. In deren Mitte lag meist eine Feuerstelle, links und rechts davon stand ein Pfosten, darauf ruhte vermutlich das Dach. Baugleiche Vorratshütten fielen kleiner aus. Diese Bauweise prägte damals auch das Stadtbild der Hauptstadt; sie ist auch heute noch im Zentral- und Mittelsudan in Gebrauch. Die Forscher entdeckten überdies Reste eines Gebäudes mit rechteckigem Grundriss, vermutlich diente es offiziellen oder kultischen Zwecken.

Im Mittleren Kerma baute man rechteckig oder quadratisch. Pfosten stützten die Wände und trugen Dachbalken. Man deckte solche Hütten mit Palmzweigen und -blättern, Lehm dichtete das Dach ab. Erstmals wurden luftgetrocknete Lehmbrocken mit Mörtel vermauert. Einige Gebäude bestanden

**Wie in der Antike liegen die Wohnräume heutiger sudanesischer Häuser um einen weiträumigen zentralen Hof. Die Dächer sind etwas angehoben, um Luft zirkulieren zu lassen. Getreidespeicher und Geflügelkäfige sind meist außerhalb platziert. Auch die Schutzwände aus Strohmatten gleichen historischen Vorbildern. Die Ausgrabungen zeigten, dass dieser Aufbau seit 3600 Jahren gebräuchlich ist.**



FOTOS: BRIGITTE GRATIEN

## Vom Königtum zur Pharaonenmacht – und zurück

### Das wechselvolle Schicksal Nubiens

**Der Reichtum von Kusch** weckte die Begehrlichkeit der Pharaonen. Bereits während des Alten Reichs, insbesondere der 4. Dynastie (2625–2510 v. Chr.) unternahmen sie mehrere Feldzüge. Es gelang Ägypten, Handelsstationen an strategisch wichtigen Orten Unternubiens einzurichten: an Warenumschlagplätzen am Nilufer, wie auch an den Endpunkten von Straßen, die zu Steinbrüchen führten. Während dieser Periode beuteten die Pharaonen das Land erbarmungslos aus. Nicht weniger als 7000 Menschen wurden den Schriftquellen zufolge allein bei einem Feldzug des Pharao Snofru (um 2600 v. Chr.) als Gefangene verschleppt, etwa 200000 Stück Vieh dabei geraubt.

Ab 2450 v. Chr. gestalteten sich die Beziehungen eine Weile friedlicher. Im ägyptischen Regierungsbezirk Elephantine wurde eine Art Büro für nubische Angelegenheiten eingerichtet. Um 2400 v. Chr., zur Zeit der Pharaonen Merenre und Pepi II., unternahm der Amtsleiter Harchuf vier Handelsexpeditionen nach Iam, wie die Ägypter das Kerma-Becken bezeichneten. Beim ersten Mal, so hielt er in einer autobiografischen Grabinschrift fest, reiste er mit seinem Vater dorthin, um den Weg zu erkunden. Er benötigte sieben Monate und kam zurück mit »allem, was schön und selten war«. Beim dritten Besuch traf Harchuf den Prinzen von Iam, der gerade die Stämme der östlichen Wüste seinem Reich einverleibt hatte. Der Ägypter kehrte mit 300 Eseln nach Elephantine zurück, beladen mit Weihrauch, Ebenholz, Ölen, Getreide, Panterfellen und Stoßzähnen.

Doch dieser friedliche Kontakt endete mit dem Alten Reich. Pepinacht, ein Nachfolger Harchufs, unternahm von Elephantine aus zwei Feldzüge, um ganz Unternubien zu unterwerfen. Er raubte Vieh und nahm zwei Prinzen als Geiseln. Trotz der Machtfülle dieser Beamten besaßen sie übrigens damals nicht den Rang eines ägyptischen Gaufürsten.

Im Mittleren Reich (um 2065–1785) gelang es den Pharaonen, ganz Unternubien zu besetzen und mit zwölf Befestigungsanlagen entlang des zweiten Katarakts zu sichern, die gleichzeitig als Militär-, Verwaltungs- und Handelsposten dienten. Nach der Zweiten Zwischenzeit (um 1785–1550 v. Chr.) übernahm Ägypten auch jenseits des zweiten Katarakts mehr und mehr die Kontrolle, bis Obernubien seine Eigenständigkeit um 1500 v. Chr. verlor. Die Pharaonen gründeten dort die Stadt Napata, die später Kerma als Hauptstadt ablöste.

**Erst in der Dritten Zwischenzeit** (1069–730 v. Chr.) errangen die afrikanischen Herrscher wieder die Macht, bis König Piye 728 v. Chr. seinerseits ganz Ägypten unterwarf. Er begründete die 25. Dynastie der schwarzen Pharaonen. Doch sie währte nicht einmal hundert Jahre: König Tanwetamani wurde 663 v. Chr. von den Assyrern vertrieben, in Ägypten etablierte sich eine neue einheimische Dynastie. Die Hauptstadt von Kusch wurde von Napata Richtung Süden nach Meroe verlegt. Das dortige Königreich endete schließlich etwa um 350 n. Chr.



**Dunkelhäutige Menschen entrichten dem Pharao Tribut. Das Wandgemälde im Grab des Huy, Vizekönig Nubiens zur Zeit Tutenchamuns, dokumentiert die Ausbeutung des schwarzafrikanischen Landes durch Ägypten.**

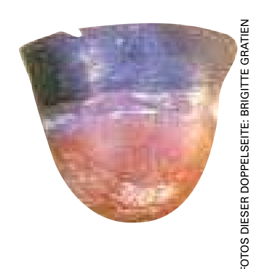
schon aus in der Sonne getrockneten Lehmziegeln, eine auch heute noch verwendete Bauweise. Alle Eingänge waren nach Süden gerichtet, denn aus Norden blies oft ein starker Wind. Einige Gruben außerhalb der Häuser dienten als Speicher, von einem Zaun und einem Dach geschützt. Andere, mit kuppelförmigem Überbau, bildeten einfache Brennöfen für Keramik: Die rohe Ware wurde mit brennbarem Material hineingesteckt und dieses angezündet. Die Häuser hatten zunächst meist nur einen Raum, im Laufe dieser Epoche kam eine Küche dazu: Offenbar erging es den Dorfbewohnern gut.

In der Klassischen Zeit zeigte sich der Reichtum des Königreichs auch in diesem Dorf: Geschickte Handwerker fertigten Gefäße in Gestalt einer Tulpenblüte aus feiner Rohmasse, die Wandungen nur einige Millimeter dick. Die Gebäude wuchsen, eines der Häuser, um einen zentralen und teilweise überdachten Hof gebaut, umfasste sogar eine Grundfläche von 200 Quadratmetern. Auf der Westseite lagen drei Zimmer, eines davon mit einem Nebeneingang. Im Osten mündeten zwei große Gemeinschaftsräume in eine Küche mit sehr großer Feuerstelle. An die Wände waren Bänkchen gebaut, die als Sitz oder Ablage gedient haben mögen. Gestampfter Lehm bildete den Boden, mindestens eine Wand hatte man weiß bemalt.

Auch heute noch ist die Architektur dieser Zeit lebendig. Größere moderne Häuser besitzen einen zentralen Innenhof. Zwischen Dach und Mauer lässt man Abstand, sodass die Luft zirkulieren kann. Runde Speicher bestehen aus Lehm. Im Hof oder vor dem Haus be- ▷







FOTOS DIESER DOPPELSEITE: BRIGITTE GRATIEN

**Fein gearbeitete Tulpenvasen mit rotem Farbton und schwarzem oberen Rand zeugen vom hohen Können der Töpfer in der Klassischen Zeit Kermas.**

finden sich Taubenschlag und Hühnerstall. Kleinvieh wird in Pferchen aus dornigen Pflanzen gehalten, meist im Schatten eines Baums. Wie in der Antike liegen die Viehweiden im Hinterland, die Äcker an den fruchtbaren Nilufern.

Der zweite Grabungsplatz in der Umgebung von Kerma liegt an einem jüngeren Nilarm, er war nur zwischen 1700 und 1500 v. Chr., also in der Klassischen Zeit, bewohnt. Offenbar kam diesem Dorf größere Bedeutung zu als dem ersten. Denn mitten im Ort befand sich ein rechteckiges Gebäude mit immerhin zwölf Meter Seitenlänge. Seine Lehmziegel ähneln einander derart, dass eine Herstellung mit »standardisierten« Formen anzunehmen ist. Insgesamt vier Zimmer lagen links und rechts eines zentralen Flurs. Eines davon hatte wohl eine wichtige zeremonielle Funktion innerhalb des Hauses: Zwei Sandsteinsäulen zierten den Eingang, der Boden dort war gepflastert, die Wände verputzt. Die Archäologen vermuten, dass in diesem Raum ein Hochrangiger einst Hof hielt.

Bei einem Brand war das Dach eingestürzt und hatte allerlei Gegenstände unter sich begraben, sie dadurch aber auch vor Diebstahl und Verfall bewahrt. Diverse Steinwerkzeuge lagen so beieinander, dass sie die Forscher an die Grundausstattung von Handwerkern erinnern: eine polierte Steinaxt, Stichel, ein Schleifwerkzeug, ein Gazellenhorn und verschiedene kleinere Behältnisse. Außerdem kamen mehrere Parfümflaschen aus Alabaster ans Licht – sicher ägyptische Importware – elfenbeinerne Messergriffe und zahllose Perlen aus der Schale von Straußeneiern oder aus ägyptischer Fayence.

Angesichts des außergewöhnlichen Bauplans, des reichen Mobiliars und der ägyptischen Importwaren lässt sich vermuten, dass dort zum Beispiel der Statthalter der Region residierte. Eine Kultstätte war das Haus sicher nicht, denn es unterscheidet sich doch sehr von dem Tempel Kermas oder den dortigen Grabkapellen.

Die Ausgräber waren noch mehr verblüfft, als sie bei mehreren vier bis sechs Meter langen Häusern Fundamente aus

KOLORIERUNG: EMDE-GRAFIK / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

**Die »Große Hütte« (links) und das »Nord-West-Quartier« waren Teil der Tempel- und Palastanlage im Stadtzentrum von Kerma (Zeichnungen aus: Charles Bonnet: Kerma, Royaume de Nubie, Genf 1990, Ausstellungskatalog).**



Tierfiguren aus der Späten Periode Kermas (um 1500 v. Chr.) sollten möglicherweise in Zeiten des Wassermangels echte Tieropfer ersetzen.

Sandsteinplatten ans Licht brachten. Das Baumaterial kommt vor Ort nicht vor und musste in jedem Fall über einige Kilometer herangebracht worden sein. Die großen Sandsteine sollten anscheinend Unebenheiten des nur grob planierten Erdbodens ausgleichen. Ein Holzrahmen auf den Platten hatte dann die Bodenbretter getragen. Eine solche Bauweise war bislang weder aus Nubien noch aus Ägypten bekannt. Der Befund ist nach wie vor rätselhaft.

Zum Ende der klassischen Kerma-Zeit zerstörte Feuer das Dorf und die Einwohner zogen fort. War der Eroberungsfeldzug Ägyptens um 1500 v. Chr. die Ursache? Ein anderer Grund scheint ebenso wahrscheinlich: Wasserknappheit. Das französische Team fand heraus, dass der Nil während der Kerma-Epochen seinen Lauf um insgesamt etwa fünf Kilometer verschoben hatte. Viele Dörfer blieben für ein Jahrtausend besiedelt, doch einige mussten aufgegeben werden und entstanden andernorts am Ufer neu.

## Ein Schmelztiegel afrikanischer und ägyptischer Kulturen

Bald darauf aber entstand ein neues Dorf, in dem sich traditionelle nubische Bauweisen – ein Hauptzimmer und eine Küche – mit ägyptischen vermengten – geformte, durch Mörtel verbundene Ziegel guter Qualität. Das häusliche Leben fand wohl in einem offenen Hof statt. Dort grub man große Vorratskrüge ein, die ebenso wie im Niltal gedreht und gebrannt wurden. Nördlich der Häuser befanden sich entsprechende Werkstätten mit Öfen für Keramik, aber auch für die Metallverarbeitung.

In jene Zeit datieren Hunderte von Tierfiguren aus Ton – meist Rinder, aber auch Hunde, Pferde, Schafe und Widder (siehe Bild oben). Einige trugen Verzierungen, wie sie auch auf den heiligen Schafen aus den Gräbern oder auf den Felsmalereien in der orientalischen Sahara zu sehen sind. Geometrische Zeichen und Vogeldarstellungen waren einigen Rindern auf Schulter oder Schenkel eingeritzt, möglicherweise Kennzeichen des Besitzers. Ganz offenbar dienten diese Figuren nicht als Spielzeug oder Rechenhilfe, sondern als Kultgegenstände. Dergleichen fand man auch andernorts: Sicherlich herrschte erneut Wasserknappheit. Es gab nicht mehr genug feuchte Wiesen am Nilufer und die Viehbestände schrumpften. Anders als die vom Ackerbau abhängigen Siedlungen der Klassischen Zeit konnten die Dorfbewohner des Späten Kerma zwar die Weidegebiete wechseln und so die Grundversorgung sichern. Allerdings waren Tieropfer nur noch bedingt möglich, und Tonfiguren übernahmen wohl symbolhaft diese Rolle bei rituellen Handlungen.

Alles in allem haben die Archäologen mittlerweile ein recht gutes Bild des Alltags in den Dörfern gewonnen. Landwirtschaft war stets die wichtigste Ressource in der Region: Gerste, Datteln und Palmnüsse standen schon zu Beginn der Mittleren Kerma-Kultur auf dem Speiseplan, wichtiger noch war aber vermutlich lange die Viehzucht. Analysen von Rinderknochen aus Kerma durch Charles Bonnet von der Universität Genf belegen, dass in der Hauptstadt Kerma verzehrtes Vieh mitunter aus entfernten Regionen im Süden stammte.

Auf dem Lande hingegen begnügten sich die Dorfbewohner mit dem Fleisch von Schaf und Ziege, nur gelegentlich auch mit Rindfleisch oder Fisch. Wie es auch die heutigen Stämme am Nilufer halten, wurden die Tiere vermutlich komplett verwertet, angefangen vom Fleisch und Fell bis hin zu ihrem Blut.

Geschickt fertigten die Bewohner vor Ort ihre Gebrauchskeramik, gewannen Kupfer und verarbeiteten Straußeneier oder schöne Steine zu Schmuckperlen. Wer es sich leisten konnte, erwarb ägyptische Waren von Händlern, die auf dem Nil fuhren: Gefäße mit Öl oder Milchprodukten, Parfümvasen, Schmuck und Amulette. Es war eine Kultur, in der sich afrikanische und ägyptische Traditionen vermischten. Wie diese Gesellschaft organisiert war, bleibt für die Archäologen eine der spannendsten Fragen. ◁

**AUTORIN UND LITERATURHINWEISE**



Der Artikel basiert auf dem Beitrag »Kerma, le rival africain de Égypte« von **Brigitte Gratien** in: Pour La Science, 11/2003, S. 56.

Die Pyramiden der Schwarzen Pharaonen. Von Bob Brier. In: Abenteuer Archäologie, Heft 1, 2004, S. 30

Nubien. Antike Monumente zwischen Assuan und Khartoum. Vom Joachim Willeitner. Hirmer Verlag, 1997

Sudan – Antike Königreiche am Nil. Ausstellungskatalog Hypo-Kulturstiftung München. Hirmer-Verlag 1996

Kerma – Territoire et métropole. Von Charles Bonnet. Institut Français d'Archéologie Orientale du Caire, 1986

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

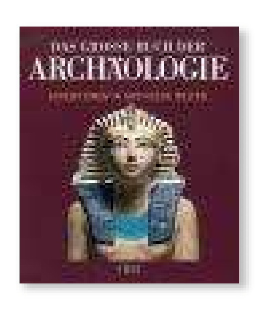
ARCHÄOLOGIE

**Peter-Matthias Gaede (Hg.)**

## Das große Buch der Archäologie

**Expeditionen in mythische Welten**

Geo, Hamburg 2003. 248 Seiten, € 49,–




Das Volk der Anasazi, das im trockenen Südwesten der heutigen USA lebte, verschwand im 13. Jahrhundert auf ungeklärte Weise. Gut erhaltene Behausungen zeigen keine Spuren kriegerischer Gewalt, nichts spricht für eine Naturkatastrophe. Spekulationen blühten bis hin zu der abstrusen Hypothese, das Volk sei nach 500-jähriger kultureller Blüte mit Mann und Maus von Außerirdischen verschleppt worden. Neuere Forschungen haben das idealisierte Bild der Anasazi sehr relativiert: Sie waren nicht nur Kannibalen, sondern führten wahrscheinlich auch ihren Untergang durch Raubbau an ihrer Umwelt selbst herbei.

Der überaus grausame Eroberungsfeldzug des Mongolenfürsten Dschingis Khan (um 1162–1227) hat unser Bild von den »wilden« und »brutalen« Steppenkriegern geprägt. Kaum bekannt ist, dass hinter den Grenzen des Weltreichs eine »Pax mongolica«, die immerhin so lange währte wie das Leben des Herrschers, blühende Landschaften im Osten gedeihen ließ. Das Grab Dschingis Khans wird man kaum je finden, denn Totenkult war nicht die Sache der Mongolen; aber die von ihm gegründete Stadt Karakorum (heute Harhorin) liegt unter eineinhalb Metern Flugsand begraben und blieb von Raubgrabungen verschont.

Das sind nur zwei von den zwölf Geschichten dieses Buches. Alle erschienen in den letzten Jahren in der Zeitschrift »Geo« und wurden für diesen Sammelband eigens aktualisiert. Die verschwenderische Pracht der großformatigen, erstklassigen Bilder – »Geo-«Standard eben – erregt den Neid der Bildredakteurin, und der flüssige Erzählstil erinnert mich an die Jugendbilderbücher über Moorleichen, den Kult der Azteken und mehr, die ich als 14-Jährige verschlungen habe. Diese dramatischen Geschichten, die aus den archäologischen Funden rekonstruiert wurden, auf dem neuesten Stand der Forschung und so eindrucksvoll bebildert wiederzusehen, macht noch immer großen Spaß.

*Alice Krüßmann*

Die Rezensentin ist Bildredakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.

**In der computergrafischen Nachbearbeitung erstrahlen die Mosaikböden dieser Villa der antiken Stadt Zeugma im Süden der Türkei kurz vor deren erneutem Untergang noch einmal. Wie viele andere erst kürzlich entdeckte Gebäude der reichen Metropole am Euphrat bedeckt das Anwesen nun der Stausee, den der Birecik-Damm seit November 1999 schuf.**

PHILOSOPHIE

**Christian Göldenboog**

## Das Loch im Walfisch

**Die Philosophie der Biologie**

Klett-Cotta, Stuttgart 2003. 270 Seiten, € 20,–



Aus Sicht der Philosophie ist es die Biologie, die den naturwissenschaftlichen Stein des Anstoßes bildet, nicht die Physik. Mit den klaren physikalischen Gesetzen kann sich ein Philosoph abfinden, sogar anfreunden. Aber selbst Physiker wie Richard Feynman, und von ihnen geistig genährt auch Teile des Wissenschaft konsumierenden Publikums, sehen eine Kluft zwischen den so genannten exakten Naturwissenschaften und der Biologie.

Nach Feynman – und vielen anderen Physikern – ist Ziel jeder Naturwissenschaft, vorauszusagen, was in einem nie ausgeführten Experiment geschehen wird; er behauptet sogar, dass alles, was Lebewesen tun, daraus verständlich zu machen wäre, dass sie aus Atomen zusammengesetzt sind, die sich gemäß den physikalischen Gesetzen verhalten. Aber ein System, zumal ein lebendes, besteht nicht nur aus seinen Teilen, sondern wesentlich aus dem Zusammenspiel dieser Teile. Auf höheren Integrationsebenen entstehen »emergente« Eigenschaften, die sich aus der Kenntnis der Bestandteile niederer Ebenen nicht ableiten lassen. Für Ernst Mayr, den wohl größten lebenden Evolutionsbiologen und wichtigsten Denkpartner im vorliegenden Buch, ist das ein grundlegendes Merkmal der organischen Welt.

**Zumindest ist die Biologie unabhängig von den physikalischen Wissenschaften**

Der Journalist Christian Göldenboog («Süddeutsche Zeitung« und »Philosophie heute«) unternimmt es, die Rolle der Biologie für die Wissenschaftsphilosophie zu klären. Mit Wissenschaft ist hier (selbstverständlich?) Naturwissenschaft gemeint.

Weltformelsüchtige Wissenschaftler möchten die ganze Biologie – mit ihren zu wenig konkreten Gesetzmäßigkeiten, den ständigen Neuerungen durch Evolution und Lernvermögen sowie den zuweilen widersinnig erscheinenden Marotten der Partnerwahl unter sexueller Selektion – nicht nur mit spitzen Fingern, sondern am liebsten gar nicht anfassen. Ist die Biologie, wenn es in ihr zwar genetische Programme, aber keine universalen Gesetze gibt, überhaupt eine richtige Wissenschaft? Nun, sie ist zumindest unabhängig von den physikalischen Wissenschaften. Das ermisst Ernst Mayr daran, dass noch keine revolutionäre physikalische Theorie irgendeine Änderung einer biologischen Theorie zur Folge hatte. Nichts in der Biologie ergibt einen Sinn, außer im Licht der Evolution, schrieb der Genetiker Theodosius Dobzhansky; ersetzt man »Evolution« durch »Gravitationsgesetz« oder »Unbestimmtheitsrelation«, so wird der Satz unsinnig.

Göldenboog nimmt vor allem das spezielle Problem der Evolution aufs Korn, ausführlich am Beispiel der Entstehung der Arten und der Molekularbiologie. Und er hebt dann die Biologie als neue Leitwissenschaft hervor, und zwar in Form von teils wörtlichen, teils virtuellen Gesprächen mit einem Physiker, einem Populationsgenetiker, einem Evolutionsgenetiker, einem Soziobiologen, und abschließend mit Ernst Mayr. Ganz gut heraus kommen dabei die unterschiedlichen Denk- und Argumentationsweisen, aus denen ein Gesamtbild der Biologie entstehen muss. Bevor es aber dazu kommt, kann der Leser durch verschiedene fachspezifische Fenster auf Teile dieses Gesamtbilds blicken, und er muss dabei zuweilen kräftig mitdenken.

Ein Vorteil für ihn ist, dass der Autor des Buchs sich in diese vielschichtige Materie selbst einarbeiten musste und so die Lage des Lesers noch mühelos nachvollziehen kann. Wo allerdings Herr Göldenboog stockt, bleibt auch ein eifrig mitdenkender Leser ratlos. Es ist richtig, dass ein Helfer seinen eigenen Genen nützen kann, wenn diese auch im Hilfsbedürftigen stecken; die Wahrscheinlichkeit dafür wächst mit dem Verwandtschaftsgrad. Aber bei der Frage, auf wessen Konto dieser Nutzen zu buchen ist (des Helfers? des Nutznießers? der gemeinsamen Gene?), geht es dann durcheinander. ▷

Bei Bienen sind Schwestern näher miteinander verwandt als Mutter und Tochter; so gelangen mehr Kopien der eigenen Gene in die nächste Generation, wenn Arbeiterinnen unfruchtbar sind und Schwestern aufziehen. Aber das wirkt sich evolutionär nur aus, wenn diese Schwestern nicht unfruchtbar bleiben, sondern Königinnen werden. Und Söhne, die ja zu hundert Prozent mit Mutter und Schwestern verwandt sind, sollten erst recht pflegen, tun es aber nicht.

Teleologisches Argumentieren, das in den Naturwissenschaften keinen Platz hat, wird im Text zwar mehrmals verurteilt, schleicht sich aber dann doch durch einen Sprachstil ein, der das Ergebnis als Zweck beschreibt: »Will eine Art überleben, so benötigt sie …« statt »Wenn eine Art überlebt hat, dann hatte sie …«; oder »Wenn die Population zahlenmäßig gleich bleiben soll …«; aber soll sie denn?

Nicht nur Biologiestudenten werden in dem Buch viel Wissenswertes und Anregendes entdecken und auf moderne Facetten einer faszinierenden Biologie stoßen, und zwar in einem weiten Fächer von Denkrichtungen, von der Doppelhelix bis zu außergalaktischem Leben. Eine Philosophie der Biologie, die der Untertitel des Buches andeutet, werden sie sich selber daraus machen müssen.

*Wolfgang Wickler*

Der Rezensent ist kommissarischer Leiter des Max-Planck-Instituts für Verhaltensphysiologie in Seewiesen.

QUANTENPHYSIK

**Oliver Morsch**

## Licht und Materie

**Eine physikalische Beziehungsgeschichte**

Wiley-VCH, Weinheim 2003. 272 Seiten, € 24,90

Der Forscher und Wissenschaftsjournalist Oliver Morsch will mit dem vorliegenden Buch dem Leser die Quantenoptik und verwandte Gebiete der modernen Physik näher bringen. »Scheinbar unnütze und unzusammenhängende Entdeckungen … haben unerwartete wissenschaftliche Erkenntnisse und bedeutende Technologien hervorgebracht«, so zitiert der Autor den Quantenphysiker Theodor Hänsch; er nimmt den Leser mit auf eine Rundreise durch die Grundlagenforschung auf diesem Gebiet, deren mögliche technische Anwendungen noch in keiner Weise absehbar sind.

In den beiden ersten Kapiteln erzählt der Autor die Geschichte der Atomtheorie sowie die unserer Vorstellung vom Licht, und zwar so schön elementar und nachvollziehbar, dass er auch fachlich fern stehende Leser begeistern kann. Das Thema des nächsten Kapitels, Quantenmechanik, ist schon schwerer verdaulich; da gerät aus Platzmangel die Argumentation gelegentlich etwas flüchtig, und für den Neuling bleiben Fragen offen.

Danach ist Morsch bei seinem eigentlichen Thema, der Wechselwirkung von Licht und Materie, angekommen und erzählt ausführlich von der Erfindung des Lasers und seinen Anwendungen. Man erfährt so manches amüsante Detail: Angeblich hat einer der Erfinder des ersten Lasers, Arthur Schawlow, einmal sogar einen Wackelpudding zur Emission von Laserlicht gebracht – und anschließend verspeist.

Der Laser ist unabdingbares Werkzeug der physikalischen Grundlagenforschung geworden. Bei der Laserkühlung wird Materieteilchen kinetische Energie entzogen, was wiederum vielfältige Anwendungen ermöglicht. Auch bei der experimentellen Verwirklichung der Bose-Einstein-Kondensation, oder wenn es darum geht, einzelne Atome in Ionenfallen einzusperren, sind derartige Kühlmethoden wichtig (Spektrum der Wissenschaft 6/2003, S. 28). Langfristig winken hier der Bau eines Quantencomputers (Spektrum der Wissenschaft 4/2003, S. 48) oder die Verwirklichung einer Quantenkryptografie. In den letzten Jahren gelang es, Licht durch die Dispersionswirkung kalter Atome abzubremsen und sogar zum Stillstand zu bringen. Gegenüber der Laserkühlung vertauschen dabei Licht und Materie ihre Rollen. ▷

**Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online**



**Heinrich Hemme**

**Die Quadrate des Teufels**

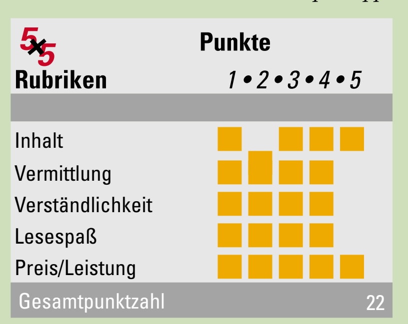
**112 mathematische Rätsel mit ausführlichen Lösungen**

Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2003. 127 Seiten, € 14,90

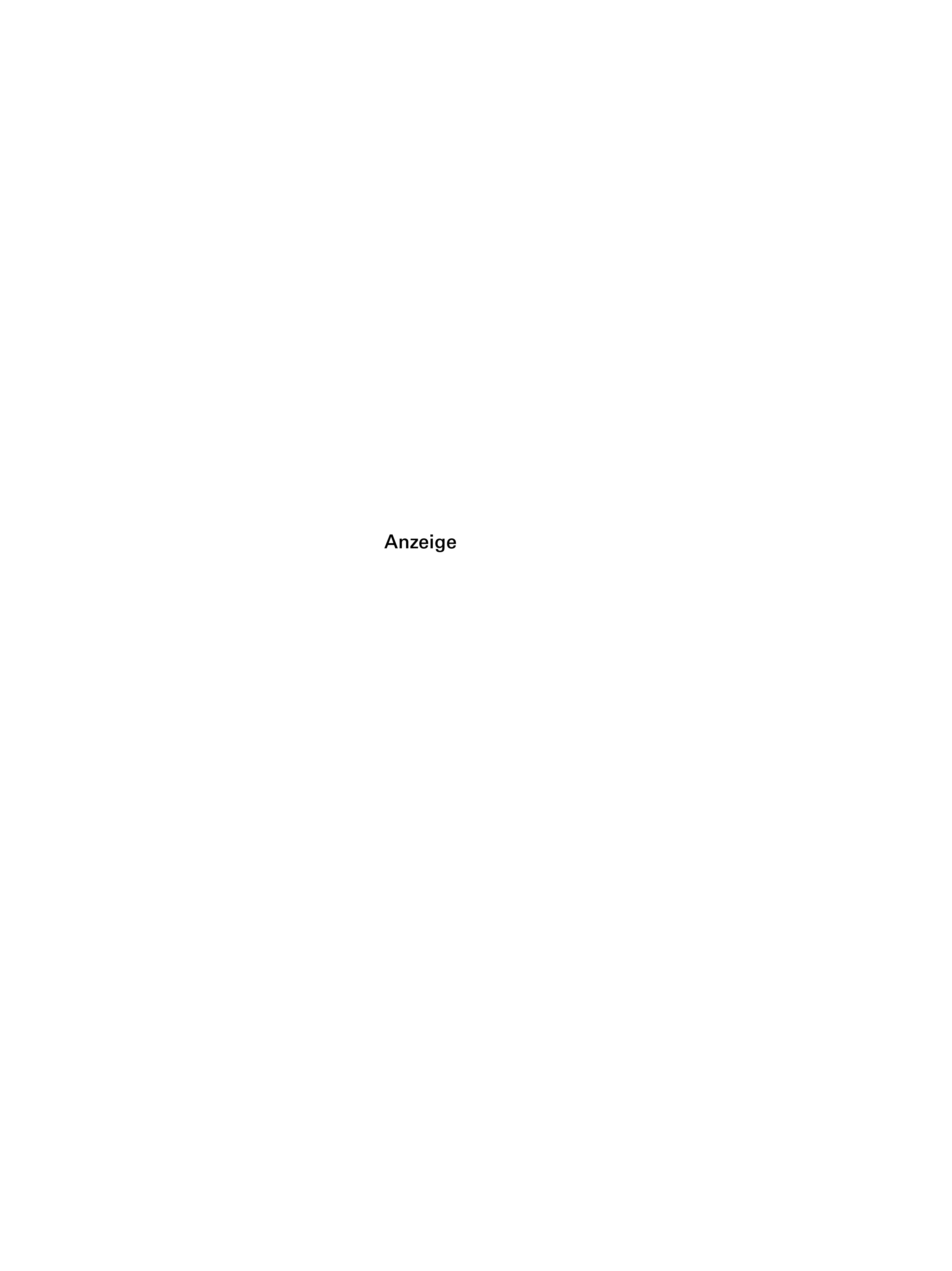
Es gibt Klassiker unter den mathematischen Rätseln, die von Generation zu Generation weitergereicht werden und deren Ursprünge sich im Dunkeln verlieren. Heinrich Hemme, Physikprofessor an der Fachhochschule in Aachen, hat nicht nur eine sehr bunte Sammlung bereitgestellt, sondern zu jedem Rätsel die älteste Quelle angegeben, die er finden konnte.

Aber keine Sorge, Sie müssen kein Interesse für den Ur-Autor aufbringen, um an dem Buch Ihren Spaß zu haben. Jedes Rätsel ist eine neue Herausforderung, und erfrischend obendrein, denn die genialen Gedanken, mit denen Sie das letzte Rätsel gelöst haben, sind für das nächste in aller Regel unbrauchbar. Damit reiht sich das Buch als siebtes ein in eine Serie vergnüglicher Rätselsammlungen desselben Autors beim selben Verlag.

*Aus der Rezension von Christoph Pöppe*




Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter **http://www.wissenschaft-online.de/5x5**


Anzeige

Morsch erklärt auch exotische Phänomene wie die Teleportationsversuche zum Transport eines Quantenzustands (»Beamen«, Spektrum der Wissenschaft 6/2000, S. 30) oder den Zeno-Effekt (Spektrum der Wissenschaft 2/2002, S. 14). Das ist der merkwürdig anmutende Umstand, dass man den quantenmechanischen Zerfall durch Vornahme von Beobachtungen verzögern kann (»a watched pot never boils«). Dabei macht man sich zu Nutze, dass bei Zerfallsprozessen, die auf dem quantenmechanischen Tunneleffekt beruhen, infolge der Unschärferelation kleine Abweichungen von der exponentiellen Zerfallskurve auftreten.

Morsch hält sich weit gehend an den historischen Ablauf, sodass das Buch die Entwicklung der Quantenoptik in den letzten Jahrzehnten getreulich wiedergibt. Dazu tragen auch die als Kästen abgetrennten Kurzbiografien bedeutender Forscher bei. Ein lockerer Plauderton macht das Buch leicht lesbar und verständlich. Dazu kommt eine Fülle von Anekdoten, vom essbaren Puddinglaser bis zu dem Bariumatom, das als Erstes über Monate hinweg isoliert in einer Ionenfalle gehalten und von den Forschern liebevoll »Astrid« getauft wurde.

Kleinere Fehler haben sich bei der Beschreibung des fotoelektrischen Effekts eingeschlichen: Bei Erhöhung der Lichtintensität kommen sehr wohl mehr Elektronen aus dem Metall. Nur die Energie des einzelnen Elektrons ändert sich entgegen der klassischen Erwartung nicht. Die steigt dagegen mit der Frequenz des verwendeten Lichts an, die wiederum, sofern sie nur oberhalb der Mindestfrequenz ist, die Zahl der freigesetzten Elektronen nicht beeinflusst.

Die notorischen Paradoxa der Quantenmechanik sind nicht Thema des Buches. Morsch enthält sich jeder philosophisch angehauchten Diskussion über die Implikationen der geschilderten Phänomene, auch da, wo dies nahe liegend wäre, wie etwa beim Zeno-Effekt. Seine Sichtweise ist stets die des Experimentalphysikers, der die Dinge als gegeben annimmt und sich eher fragt, was man damit so alles machen kann.

Für wen eignet sich dieses Buch? Der größte Teil der geschilderten Phänomene und Techniken gehört heute noch zur Grundlagenforschung. Wie seinerzeit der Laser bieten sie jedoch die schönsten Aussichten auf technische Anwendungen. Wer sich in diesem Bereich frühzeitig informieren will, für den ist das Buch sicher nützlich. Abgesehen davon kann es einfach sehr spannend sein, den Forschern über die Schulter zu schauen.

Die in einfachem Stil gehaltenen Illustrationen sind gut durchdacht und unterstützen das Verständnis. Für den doch recht schmalen Band ist der Preis allerdings ziemlich stolz.

*Gerhard Mühlbauer*

Der Rezensent ist promovierter Physiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

---

BOTANIK

**Erich Götz**

## Pflanzen bestimmen mit dem PC

**CD zum Bestimmen der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands**

2. überarbeitete Auflage. Ulmer, Stuttgart 2003. € 34,90




Was blüht denn da? Wer es wissen will, greift meist zu einschlägiger Bestimmungsliteratur oder zum handlichen Bildbändchen. Beide haben Vor- und Nachteile: Das umfangreiche Florenwerk ist unhandlich und für Anfänger ungeeignet; illustrierte Bändchen bringen nur eine sehr eingeschränkte Artenauswahl. Neuere Bestimmungssoftware soll die Vorteile beider Verfahren vereinen. So kann der Pflanzenfreund unklare Bestimmungsmerkmale zunächst überspringen. Auch können mehr Arten platziert werden als im kleinen Bildband.

Zu dieser Idealvorstellung bietet die vorliegende preiswerte CD einige viel versprechende Ansätze: Aufbau und Arbeitsoberfläche sind ansprechend. Der Nutzer hat die Wahl zwischen einem Schnell-Schlüssel für Anfänger, der außer den großen Kategorien »Blütenpflanzen« und »Farnpflanzen« spezielle Einstiegspunkte wie »Disteln« oder »Wasser- und Sumpfpflanzen« anbietet. Versierte können über die Familien- oder Gattungsebene in den Schlüssel einsteigen oder direkt über den lateinischen Pflanzennamen zur Artbeschreibung gelangen. Schließlich ist noch eine Gesamtartenliste vorhanden.


OSKAR ANGERER

Blütenzapfen des Riesenschachtelhalms, *Equisetum telmateia*

Viele Merkmale sind illustriert, das erleichtert die Bestimmung für Einsteiger. Besonders ermutigend: Nach jedem Schritt wird die Zahl der verbleibenden Möglichkeiten samt Ergebnisliste angezeigt. Schön, aber nur bedingt hilfreich sind die Fotografien aus dem »Bildatlas der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands« von Henning Haeupler und Thomas Muer (Spektrum der Wissenschaft 10/2001, S. 106). Trotz Vergößerungsmöglichkeit reicht die Auflösung oft nicht aus, um etwa die Blüte genauer zu erkennen, und nicht zu allen Arten sind Fotos vorhanden.

Leider fehlen häufig Verknüpfungen. So ist zu manchen Arten »kein Bild vorhanden«, wenn man sie über den Schnellschlüssel auffindet, wohl aber als Ergebnis der Direktsuche. Die Beschreibung der Bestimmungsmerkmale dagegen erhält man in der Direktsuche nicht. Die Suche nach deutschen Namen ist in der Originalversion nicht möglich. Inzwischen ist jedoch ein kostenloses Update vom Hersteller erhältlich, der diese Funktion verbessern soll. Kategorien wie »Disteln« und »Blütenpflanzen« machen auf den ersten Blick keinen Sinn, sind aber vielleicht für Anfänger geeignet. Auf der anderen Seite sollen jene Anfänger sich aber in einer verwirrenden Anzahl von Blütenbauplänen zurechtfinden.

Hauptvorteil des Programms ist, dass der Benutzer an jeder Stelle des Prozesses unter verschiedenen Merkmalen dasjenige auswählen kann, das die Suche am wirksamsten einengt. Dazu markiert das Programm die hilfreichsten Kriterien – aber nicht immer. So kommt man häufig in die Verlegenheit, Fragen nach völlig irrelevanten Merkmalen abzuarbeiten. Ein Doppelklick auf einen Familiennamen ist ein Wagnis. Während der Buch-Botaniker zurückblättern kann, muss sein PC-Kollege mangels »Undo-«Funktion unter Umständen von vorne beginnen.

Insgesamt vermittelt die Bestimmungs-CD einen noch unfertigen Eindruck, und es sind auch kleinere sachliche Fehler zu bemängeln. Potenzielle Fehlerquellen können auch bei »Pflanzen bestimmen mit dem PC« nur vom versierten Pflanzenkenner umschifft werden, doch der ist vermutlich trotz Blättern mit seiner »dicken Flora« immer noch schneller.

*Antje Kahlheber*

Die Rezensentin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Mainz.



MATHEMATIK

**Dietmar Dath**

## Höhenrausch

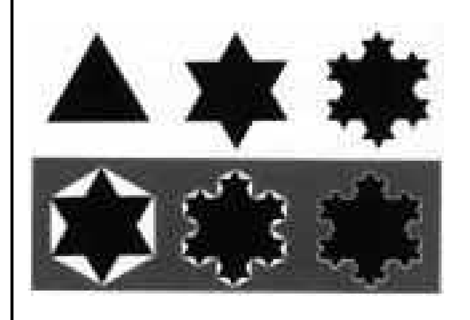
**Die Mathematik des XX. Jahrhunderts in zwanzig Gehirnen**

Eichborn, Frankfurt am Main 2003. 346 Seiten, € 27,50

Dieser mutige, ja tollkühne Versuch, das moderne mathematische Denken mit literarischen Mitteln erlebbar zu machen, ist ohne Beispiel. Dietmar Dath war Redakteur der Popmusik-Zeitschrift »Spex«, schreibt Sciencefiction und macht mit seinen stets originellen Artikeln dem Feuilleton der »Frankfurter Allgemeinen Zeitung« alle Ehre. In seinem »Höhenrausch« erscheint die Mathematik nicht als menschenleeres Gebäude aus Axiomen, Definitionen, Lemmata und Theoremen, sondern als work in progress – eine Baustelle, auf deren Gerüst die ungewöhnlichsten Menschen umherklettern.

In zwanzig Porträts bedeutender Mathematiker – darunter drei Frauen, von denen eine fiktiv ist – versucht Dath, durch ständigen Wechsel der literarischen Form die Vielfalt mathematischen Denkens zu symbolisieren. Gespenstergeschichte, Vampirgrusel, Märchen, Sciencefiction, Traumerzählung – kein Genre wird ausgelassen. Dazwischen kommt der Leser bei »seriösen« Essays etwas zur Ruhe; vor allem die Kapitel zu L. E. J. Brouwer, Gründer des mathematischen Intuitionismus, und zu Stephen Wolfram, Erforscher zellularer Automaten und Prophet einer »neuen Art Wissenschaft«, sind gut recherchiert und informativ. Dath versteht sein journalistisches Handwerk und spannend vermittelt er das Klima geistiger Abenteuer.

So weit die gute Nachricht. Nun die schlechte: Dath bringt in seinem »Höhenrausch« vieles durcheinander. Exaktheit ist seine Sache nicht. Um dem Leser ein Gefühl für moderne Mathematik zu ▷



Der Weg zu einer fraktalen Struktur am Beispiel der Koch-Schneeflocke.

▷ geben, streut Dath in den Text immer wieder Kästchen mit Definitionen und Formeln ein. So etwas muss stimmen, sonst hat es keinen Sinn; bei Dath stimmt es oft nicht. Auch im Text sträuben sich einem bei manchen Formulierungen die Haare: Quantenmechanische Orte und Impulse »kommunizieren nicht« (statt nicht zu kommutieren), die kombinierte Wahrscheinlichkeit zweier Ereignisse ist angeblich die Summe (statt das Produkt) der Einzelwahrscheinlichkeiten, und über Quarks heißt es: »Quarks sind Elementarteilchen. Sie bestehen aus Hadronen, die sich in Baryonen und Mesonen unterteilen lassen, zu denen unter anderem Protonen, Neutronen und Pionen gehören.«

Schade, dass kein Fachlektor so offensichtliche Schnitzer ausmerzen durfte. Das ehrgeizige, wagemutige und schön gefertigte Buch, aus dem echte Begeisterung für die Mathematik und geradezu Liebe zu ihren Protagonisten spricht, hätte einen abschließenden Kontrollgang verdient gehabt.

*Michael Springer*

Der Rezensent ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft in Heidelberg.

ANTHROPOLOGIE

**Steve Olson**

## Herkunft und Geschichte des Menschen

**Was die Gene über unsere Vergangenheit verraten**

Aus dem Amerikanischen von Ulrike Bischoff.
Berlin Verlag, Berlin 2003. 422 Seiten, € 22,–




Der Werbetext auf dem Umschlag stimmt euphorisch: »Steve Olson erzählt die letzten 150 000 Jahre Menschheitsgeschichte anhand der Informationen, die sich aus unserer DNA ergeben. Seine leicht zu lesende, packende Schilderung räumt mit jedem Rassismus auf. Die Gene aller Menschen gehen auf eine Urmutter zurück.« Der amerikanische Wissenschaftsjournalist Steve Olson gliedert seine Geschichte entlang der geografischen Herkunft der Menschen. Dabei bedient er sich vieler populärer Schlagwörter, die in einem Sachbuch zu dem ohnehin spannenden Thema entbehrlich wären. Bereits in der Einleitung stehen pastorale Verkündigungen wie »Die Genforschung bietet uns eine Chance, die Welt von großem Leid zu befreien« neben voyeuristischen Verheißungen: »Es ist eine der besten Geschichten, die Sie je hören werden. Sie ist abenteuerlich, voller Konflikte, Triumphe und Sex – jede Menge Sex.«

Einzelne Kapitel sind wirklich interessant und spannend, so etwa das über die genetische Geschichte der Juden. In deren Glaubensgemeinschaft spielt die Abstammung eine wichtige Rolle. Im Buch Exodus bestimmt Gott Moses' Bruder Aaron und seine männlichen Nachkommen zu Hohepriestern. Noch heute haben Männer, die sich zu den direkten männlichen Nachfahren Aarons zählen, einen besonderen Status; man bezeichnet sie mit dem hebräischen Wort für Priester als »Kohanim«. Viele tragen Nachnamen wie Cohen, Cohn, Kahn. Da Männer jeweils ihr Y-Chromosom an ihre Söhne weitergeben, müssten – wenn die Geschichte stimmt – alle Nachfahren Aarons in männlicher Linie dessen Y-Chromosom tragen; allenfalls wären leichte Abwandlungen auf Grund von Mutationen zu erwarten. Untersuchungen an 200 männlichen Juden aus Israel, Nordamerika und England ergaben: Bei denjenigen, die sich nicht als Kohanim einstufen, gibt es eine große Vielfalt von Y-Chromosomen. Hingegen hat etwa die Hälfte der Kohanim das gleiche Y-Chromosom. Dem

Mutationsmuster zufolge müsste deren letzter gemeinsamer Vorfahre vor etwa 100 Generationen gelebt haben, könnte also von einem alttestamentarischen Ahnen abstammen.

Insgesamt macht das Buch jedoch an vielen Stellen einen unaufrichtigen Eindruck – als hätte Olson sich zu seiner Predigt die passenden Fakten zusammengesucht. Geradezu stereotyp trägt er sein Credo der politischen Korrektheit vor: Es gibt keine Rassen, und Unterschiede zwischen Menschengruppen sind allenfalls oberflächlicher Natur. Zu allen Zeiten gab es Genfluss (Sex) zwischen Populationen und Volksgruppen, und daher ist der Begriff der »Rasse« ein rein kulturelles Produkt. Genetische Unterschiede sind zu vernachlässigen.

Aber so trivial ist die Geschichte der Menschen nicht. Mit Ausnahme einiger Anthropologen kann fast jeder mit großer Treffsicherheit Menschen aus verschiedenen Teilen der Welt unterscheiden. Es wird sich dabei kaum um pure Einbildung oder gar rassistische Hirngespinste handeln. Der biologische Hintergrund ist, dass sich zwischen zwei Populationen bereits nach wenigen Generationen unterschiedliche Merkmale herausbilden können, auch wenn es einen gewissen Grad an Durchmischung gibt. Handelt es sich um Buntbarsche aus dem Viktoriasee, dann hat niemand ein Problem mit der Unterteilung in Subspezies oder »Rassen«. Und bei Homo sapiens sollte das nicht anders sein. Hier wie dort gilt übrigens auch, dass bereits geringfügige genetische Unterschiede (im Extremfall einzelne Punktmutationen!) zu entscheidenden Unterschieden in der Biologie der betroffenen Organismen führen können. Nahe genetische Verwandtschaft bedeutet deshalb noch lange nicht, dass Unterschiede unerheblich wären.

Leider baut Olson seine Argumentationskette so zusammen, wie es ihm gerade passt. Die Hautfarbe strapaziert er dabei besonders: Einerseits gilt sie ihm als »diagnostisches Merkmal« und damit als wertneutral, andererseits tut er statistische Zusammenhänge zwischen Hautfarbe und geografischer Herkunft als belanglos und deren Betonung als nicht seriös und willkürlich ab. Aber bereits Darwin kam zu dem Schluss, dass neben der natürlichen Selektion (Anpassung an Sonneneinstrahlung, Vitamin-D-Produktion) besonders die sexuelle Selektion eine große Rolle bei der Fixierung von äußerlichen, populationsspezifischen Merkmalen wie Haut- und Haarfarbe oder Körperbau spielt.

Eine sehr sachbezogene Abhandlung über »Patriotismus, Nationalismus und Rassismus« liefern Jan Klein und Naoyuki Takahata in ihrem Buch »Where do we come from« (besprochen in Spektrum der Wissenschaft 6/2003, S. 97). Hier werden die Unterschiede zwischen den verschiedenen Menschengruppen wesentlich rationaler erklärt. Unterschiede zu akzeptieren heißt nicht, dass eine Gruppe von Menschen besser oder intelligenter oder schöner ist. Die Ideologie des Rassismus wird mit einem »Gleichmacher-Buch« wie dem von Olson nicht aus der Welt geräumt. Nur wenn wir die Unterschiede erkennen, akzeptieren und tolerieren, wird es eine Verständigung zwischen den Kulturen geben.

Außerdem merkt man dem Buch an, dass Olson nicht aus seinem eigenen Forscherleben berichtet, sondern über die wissenschaftlichen Erkenntnisse anderer schreibt. Darin unterscheidet er sich ▷





▷ zum Beispiel von Bryan Sykes, der in seinem Buch »Die sieben Töchter Evas« sehr anschaulich seine persönlichen Erfahrungen und Erlebnisse in eine spannende Story verwebt (Spektrum der Wissenschaft 6/2002, S. 110). Der narrative, weniger lebendige Ton Olsons wirkt streckenweise etwas ermüdend. Außerdem würde man gerne mehr Zusammenhänge verstehen, statt immer nur mit dem Spruch »die genetische Analyse hat gezeigt …« abgespeist zu werden. Die grundlegenden Mechanismen, die für die Muster genetischer Variation verantwortlich sind, nämlich Mutationen, Selektion und insbesondere ein Zufallsprozess namens genetische Drift, werden nur oberflächlich erklärt. Letzterer wird bestenfalls als »genetischer Zufall« bezeichnet, worunter sich der Nichtspezialist (an den sich das Buch wendet) nichts vorstellen kann. So muss sich der Leser mit Olsons Interpretation der Fakten zufrieden geben.

Dass sich der Autor mit der Primärliteratur auseinander gesetzt hat, beweist die umfassende Literatursammlung am Schluss. In den 43 Seiten Anmerkungen zitiert und kommentiert Olson eine beeindruckende Anzahl von Fachartikeln, die er mit viel Umsicht zusammengesucht hat. Obwohl viele dieser Arbeiten für Laien zu speziell und zu theoretisch sind, liefern diese Zusatzinformationen einen guten Überblick über das gesamte Forschungsfeld der Menschwerdung.

*Ellen Baake und Dorit Liebers*

Ellen Baake ist mathematische Biologin und derzeit Gastprofessorin am Institut für Mathematik der Universität Wien. Dorit Liebers ist promovierte Biologin und arbeitet im DFG-Schwerpunktprogramm »Radiationen – Genese biologischer Vielfalt« an der Universität Greifswald.

TECHNIK

**Hans-Jörg Bullinger (Hg.)**

## Trendbarometer Technik

**Visionäre Produkte • Neue Werkstoffe • Fabriken der Zukunft**

Hanser, München 2004. 276 Seiten, € 24,90




Hans-Jörg Bullinger, Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, möchte mit diesem Buch ein breites Publikum dazu anregen, sich mit der Technik von morgen zu befassen. Zu diesem Zweck stellt er etwa hundert technische Neuerungen vor, die sich in der Entwicklung befinden oder seit kurzem auf dem Markt sind.

Der Fußball der Zukunft meldet per Funk seine Position und hilft dadurch Fehlentscheidungen des Schiedsrichters vermeiden; das intelligente Auto erkennt Fußgänger und Verkehrszeichen von selbst; der Haushaltsroboter bringt Getränke ans Bett und trägt den schweren Koffer. Oberflächen reinigen sich selbst, ein Superkleber härtet auf Knopfdruck aus und wird auch wieder flüssig, weil ein elektromagnetisches Wechselfeld gezielt nur den Klebstoff erhitzt. Das Windkraftwerk der Zukunft steht im Meer und ist gigantisch (125 Meter Flügelspannweite); anstelle des Akkus wird eine Mikro-Brennstoffzelle ins Handy eingebaut, und Biochips sortieren menschliche oder tierische Zellen berührungslos mit Hilfe elektromagnetischer Felder.

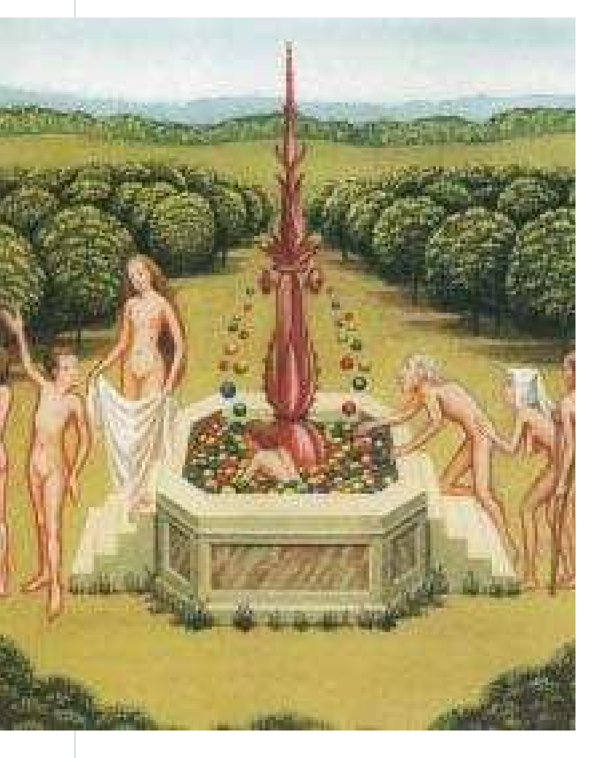
Die Forscher erläutern ihre Entwicklungen selbst, und das in erfreulicher Kürze: Jede Innovation wird auf zwei Buchseiten behandelt, knapp, übersichtlich und auf das Wesentliche beschränkt. Zahlreiche Grafiken und Fotos begleiten den Text. Forschungsprojekte der Fraunhofer-Gesellschaft nehmen den größten Raum ein. Daneben stellen auch zahlreiche führende Unternehmen ihre Entwicklungen vor, vor allem DaimlerChrysler, Siemens, Heraeus und die Degussa. Stellenweise gerät dabei das Buch zum Werbeprospekt, so zum Beispiel, wenn DaimlerChrysler zwei Seiten lang das »neue Fahrerlebnis« mit dem Versuchsauto F400 anpreist. Doch im Großen und Ganzen ist die Gratwanderung zwischen wissenschaftlicher Information und Eigenwerbung gelungen.

Einige Mängel wären vermeidbar gewesen. Nicht allen Autoren konnten sich gänzlich von ihrem Jargon lösen. Ausgerechnet das Deutsche Forschungsinstitut für Künstliche Intelligenz stellt die natürliche Intelligenz des Lesers auf eine harte Probe: »Die Prozessorientierung, die sich als zentrales Organisationsmodell in der ERP-Ära durchgesetzt hat, wird auch als übergeordnete Philosophie den Trend zu unternehmensübergreifenden Geschäftstransaktionen vorantreiben.« Jede Erfindung wird nach Innovationsgrad, Marktrelevanz und Bedeutung für die Menschheit auf einer dreistufigen Skala bewertet – wenig hilfreich, zumal nicht unmittelbar erkennbar ist, wer die Bewertung vergeben hat. Warum Brain-Computer-Interfaces für die Steuerung von Computern mit Hilfe von Gedanken auf allen drei Skalen die maximale Punktzahl bekommen, bleibt unklar. Die dreistufige Skala gestattet generell kaum Differenzierungen – hier wäre eine andere Bewertungsmethode möglicherweise geeigneter gewesen. An einigen Stellen häufen sich Rechtschreibfehler.

Das Buch wird sein selbst gestecktes Ziel, ein breites Publikum anzuregen, wohl nicht erreichen. Wer sich ohnehin für Technik und Naturwissenschaft interessiert, findet hier eine Fülle aktuellen und attraktiv aufbereiteten Materials.

*Frank Schubert*

Der Rezensent ist promovierter Biophysiker und Wissenschaftsjournalist in Berlin. ◁



◀ **Der Münchner Künstler Christoph Haußner malte nach bekannten Bildern Motive zu den einzelnen Kapiteln.**

# Aufstieg zum Gran Tribonacci

Das seltsame Land der »4-Tupel« ist weit gehend flach. Aber es gibt einen Gipfel – unbezwingbar, denn er ist unendlich hoch.

Von Achim Clausing

Hochsommer in den Dolomiten, ein strahlend schöner Tag. Auf der Bergwiese vor der Calcolata-Hütte, fast 2000 Meter hoch am Einstieg zum Gran Tribonacci gelegen, faulenzen drei Wanderer. Enrico ist ein Mathematiklehrer aus Neapel, Typ Naturbursche mit Vollbart und unvermeidlicher Pfeife. Ada und Charly studieren in London Computer Science, sie gehören eher zu der neuerdings öfter anzutreffenden Spezies der Hightech-Hiker. Enrico und das Pärchen haben sich erst beim Aufstieg zur Hütte kennen gelernt, aber bei aller Verschiedenheit versteht man sich bestens.

Während Charly sein Handy in das Subnotebook stöpselt, um im Internet den Wetterbericht nachzusehen, zeigt Ada Enrico, wie man auf ihrem GPS-Gerät die Höhe der Hütte ablesen kann. »Die hab' ich schon auf der Tafel am Hütteneingang gelesen«, lacht Enrico. Und dann zu Charly, auf die Zapfen einer Latschenkiefer deutend: »Und dass es morgen nicht mehr so schön wird wie heute, seh ich an denen da.«

»Ach komm«, meint Ada, »ich finde das spannend: Erst wenn das GPS Signale von vier Satelliten empfängt – hier, am Display sieht man, wie es einen nach dem anderen reinkriegt –, kann es die Höhe ausrechnen.«

Jetzt wird Enrico lebhaft. »Aus vier Zahlen die Höhe ausrechnen? Das ist wirklich spannend! Ich habe da nämlich was ganz Seltsames entdeckt.« Er kramt einen Bleistiftrest aus der Tasche und beginnt auf der Rückseite seiner Wanderkarte zu schreiben.

»Du fängst mit vier Zahlen an, zum Beispiel

37 18 15 3.

Diese vier Zahlen beschreiben eine Stelle im Gebirge, aber du weißt noch nicht, wie hoch sie liegt. Unter jede Zahl schreibst du den Abstand zu ihrem rechten Nachbarn:

19 3 12 34

(Die letzte Zahl hat die erste als rechten Nachbarn.) Diese Rechnung heißt ›ein Schritt abwärts‹. Jetzt machst du so lange Abwärtsschritte, bis du bei vier gleichen Zahlen ankommst – gewissermaßen im Flachland. Die Anzahl deiner Schritte bis dahin ist die ›Höhe‹ der vier Zahlen, mit denen du angefangen hast.«

Ada übt sich in der längst verlernten Kunst des Kopfrechnens. Unerwartet schnell ist alles vorbei:

| | | | |
|---|---|---|---|
| 37 | 18 | 15 | 3 |
| 19 | 3 | 12 | 34 |
| 16 | 9 | 22 | 15 |
| 7 | 13 | 7 | 1 |
| 6 | 6 | 6 | 6 |

»Nach vier Schritten ist schon finito«, kommentiert Enrico. »Nicht gerade Schwindel erregend hoch, was? Aber genau das ist das Eigenartige an der Sache: Egal, wo du startest, jedesmal bist du mit ein paar Schritten in der Ebene.«

»Vielleicht muss man für größere Höhen einfach größere Zahlen nehmen?« Ada probiert es aus, aber Enrico hat Recht:

| | | | |
|---|---|---|---|
| 596 101 | 201 938 | 203 377 | 60 249 |
| 394 163 | 1 439 | 143 128 | 535 852 |
| 392 724 | 141 689 | 392 724 | 141 689 |
| 251 035 | 251 035 | 251 035 | 251 035 |

»Es nützt dir auch nicht viel, wenn du deine Zahlen noch größer machst. Meistens bist du trotzdem ruck, zuck unten. Übrigens kommst du manchmal schon mit kleinen Zahlen etwas höher hinauf:

| | | | |
|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 4 | 9 |
| 1 | 3 | 5 | 9 |
| 2 | 2 | 4 | 8 |
| 0 | 2 | 4 | 6 |
| 2 | 2 | 2 | 6 |
| 0 | 0 | 4 | 4 |
| 0 | 4 | 0 | 4 |
| 4 | 4 | 4 | 4 |

Aber was soll's, Höhe 7 ist immer noch kein Hochgebirge.« Mit Grandezza weist er auf die Bergwelt ringsum. »Dreitausender will ich sehen!«

Inzwischen hört auch Charly zu. »Die können doch nicht so schwer zu finden sein. Du musst nur gründlich suchen! Gib mir ein paar Minuten Zeit zum Probieren.« Das nun einsetzende Tastaturgeklapper stört ein wenig die nachmittägliche Stille.

## Alle Wege führen in die Ebene

**Von jedem ganzzahligen 4-Tupel** $(a, b, c, d)$ kommt man in endlich vielen Abwärtsschritten in die Ebene, das heißt zu dem 4-Tupel (0, 0, 0, 0). Warum?

Ein Abwärtsschritt erzeugt aus dem Tupel $(a, b, c, d)$ das neue Tupel $(|a-b|, |b-c|, |c-d|, |d-a|)$. In den Beispielen von Enrico und Ada beobachtet man, dass spätestens nach vier solchen Schritten alle Zahlen gerade sind.

Das gilt immer: Wenn zum Beispiel $a$, $b$, $c$ gerade sind und $d$ ungerade ist, dann verlaufen die Abwärtsschritte wie folgt:

$(0, 0, 0, 1) \to (0, 0, 1, 1) \to (0, 1, 0, 1) \to (1, 1, 1, 1) \to (0, 0, 0, 0)$.

Dabei steht 0 für eine gerade und 1 für eine ungerade Zahl, $\to$ für einen Abwärtsschritt. Die anderen Kombinationen aus Gerade und Ungerade überlegt man sich entsprechend.

In einem Tupel aus lauter geraden Zahlen darf man jede Zahl durch 2 teilen: Wenn das halbierte Tupel vier gleiche Zahlen erreicht, dann gilt das auch für das »gerade« Tupel und damit für das Starttupel.

**Die größte unter den vier Zahlen** eines Tupels wird bei einem Abwärtsschritt zumindest nicht größer (meistens sogar kleiner). Beim Teilen durch 2 wird auch dieses Maximum des Tupels halbiert. Also kann man nach jeweils vier Schritten mit einem Tupel weiterrechnen, dessen Maximum sich halbiert hat oder noch kleiner geworden ist. Und weil alles ganzzahlig ist, landet man irgendwann unvermeidlich bei einem Tupel aus vier Nullen.

Ada liegt wieder auf dem Rücken und schaut in den blauen Himmel. »Sag mal, Enrico, woher nimmst du eigentlich die Sicherheit, dass man immer ins ›Flachland‹, also zu vier gleichen Zahlen kommt? Wenn ich im Gebirge bei jedem Schritt abwärts gehe, könnte ich ja zum Beispiel statt im Tal an einem hoch gelegenen See landen, um den ich dann höchstens noch auf gleicher Höhe herumwandern kann, ohne dass es weiter abwärts geht. Kann hier nicht auch so was passieren? Könnte man nicht vielleicht bei ein paar Vierergruppen ankommen, zwischen denen die Rechnung dann immer im Kreis läuft?«



MIT FREUNDL. GEN. VON ACHIM CLAUSING

Der Gran Tribonacci

Solche Fragen sollte man einem Mathematiker besser nicht stellen. Mit Begeisterung erklärt Enrico ihr haarklein, warum das keinesfalls vorkommen kann (Kasten links unten; siehe auch Spektrum der Wissenschaft 1/2002, S. 112). »Aber nur, wenn du mit Vierergruppen von Zahlen rechnest. Bei 3- oder 5-Tupeln tritt genau das ein, was du vermutet hast – man landet in der Regel in einem Zyklus aus mehreren Tupeln, aus dem die Rechnung nicht mehr herausfindet.«

»Tupel?«

»Ja. Kleiner lateinischer Sprachscherz der Mathematiker. Drei Zahlen heißen ein Tripel, vier ein Quadrupel, dann geht es weiter: Quintupel, Sextupel, …, und wenn man sich auf die Anzahl der Zahlen nicht festlegen will, nennt man es $n$-Tupel. Für $n=4$ dann ein 4-Tupel.«

Ada hat besser zugehört, als man bei ihrer schläfrigen Haltung vermuten würde. »Was du sagst, hat alles mit ganzen Zahlen zu tun. Wie sehen denn die Höhen aus, wenn du etwas krummere Zahlen nimmst? Dann könnten die Zahlen bei den Abwärtsschritten doch immer kleiner werden, ohne dass das jemals aufhört, oder?«

»Eine wunderbare Frage, Ada, ehrlich! Aber es geht wie durch ein Wunder nicht so, sondern man kommt ebenfalls blitzschnell auf vier gleiche Zahlen. Schau, dieses Beispiel ist typisch.« Enrico rechnet mit beeindruckender Geschwindigkeit:

| | | | |
|---|---|---|---|
| $1$ | $e$ | $\sqrt{7}$ | $\pi$ |
| $e-1$ | $e-\sqrt{7}$ | $\pi-\sqrt{7}$ | $\pi-1$ |
| $\sqrt{7}-1$ | $\pi-e$ | $\sqrt{7}-1$ | $\pi-e$ |

Und schon in der nächsten Zeile steht viermal derselbe Ausdruck: $\sqrt{7}+e-\pi-1$. »Alles exakt gerechnet, nicht mit Näherungswerten wie $e=2{,}71828\ldots$ oder $\sqrt{7}=2{,}64575\ldots$ Aber die Zahlen in die- ▷

## Der Weg nach oben: die Tribonaccizahlen

**Für eine genauere Beschreibung** des Aufstiegs nummerieren wir die Tribonaccizahlen: $t_0=0,\ t_1=0,\ t_2=1,\ t_{n+3}=t_n+t_{n+1}+t_{n+2}$. Das $n$-te »Tribonaccitupel« ist dann $T_n=(t_n,\ t_{n+1},\ t_{n+2},\ t_{n+3})$. Die ersten drei Abwärtsschritte von $T_n$ aus verlaufen so:

$$T_n \rightarrow T_{n-2}+T_{n-1} \rightarrow T_{n-3}+T_{n-1} \rightarrow 2\cdot T_{n-2}$$

Das kann man mit etwas Geschick unschwer nachrechnen. Uns genügt ein Beispiel:

$(81, 149, 274, 504) = T_{10} \rightarrow (68, 125, 230, 423)$
$= (24, 44, 81, 149) + (44, 81, 149, 274) = T_8 + T_9$
$\rightarrow (57, 105, 193, 355) = (13, 24, 44, 81) + (44, 81, 149, 274)$
$= T_7 + T_9 \rightarrow (48, 88, 162, 298) = 2\cdot(24, 44, 81, 149) = 2\cdot T_8$

Daraus sieht man, dass beim Übergang von $T_{n-2}$ zu $T_n$ die Höhe um 3 anwächst. Die genaue Höhe des Tupels $T_n$ ist $3n/2+2$ für gerades $n$ und $(3n+1)/2$ für ungerades $n$. Der kleinste »Dreitausender« unter den Tribonaccitupeln ist demnach $T_{2000}$ mit der Höhe 3002. Die kleinste Zahl $t_{2000}$ dieses Tupels hat 529 Dezimalstellen! Wenn man diese riesige Zahl nur um 1 erhöht, so ist das geänderte Tupel schon um 998 niedriger. Klar, dass es aussichtslos ist, so hohe Tupel durch zufälliges Probieren zu suchen.

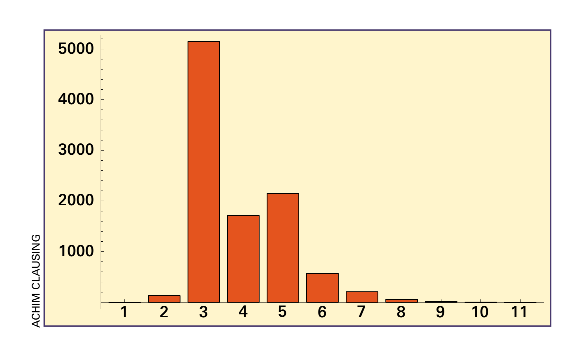
**Wie groß muss ein Tupel** mit einer vorgegebenen Höhe mindestens sein? Die Antwort gibt eine Zahlenfolge, die eng mit der Tribonaccifolge verwandt ist:

0, 1, 1, 1, 3, 3, 4, 9, 11, 13, 31, 37, 44, 105, 125, 149, 355, …

Das $n$-te Element $a_n$ dieser Folge gibt an, wie groß die größte Zahl in einem 4-Tupel der Höhe $n$ mindestens ist. Beispielsweise ist $a_7=9$, weil es Tupel der Höhe 7 mit dem Maximum 9 gibt, zum Beispiel (0, 1, 4, 9), nicht aber solche, deren Elemente alle kleiner sind als 9. Die Glieder dieser Folge sind

$$t_1,\ t_0+t_2,\ t_1+t_2,\ t_3,\ t_2+t_4,\ t_3+t_4,\ t_5,\ t_4+t_6,\ t_5+t_6,\ t_7,\ \ldots$$

Aus den Werten $a_{24}=t_{17}=5768$ und $a_{25}=t_{16}+t_{18}=13\,745$ sieht man, dass Charly mit seiner Suche in den Zahlen bis 10 000 bestenfalls ein Tupel der Höhe 24 hätte finden können.




**Charlys Statistik: So verteilen sich die Höhen von 10000 zufälligen 4-Tupeln mit Werten unterhalb von 10000. Darunter sind nur drei Tupel mit Höhe 10 und zwei mit Höhe 11: (4147, 88, 766, 1934) und (8955, 334, 4958, 7737). Das Bild ist typisch, auch für Tupel mit viel größeren Zahlen. Insbesondere hat immer ungefähr die Hälfte aller Tupel die Höhe 3.**

ser Rechnung liegen so weit auseinander, dass es egal ist, ob wir exakt oder näherungsweise rechnen. Wir könnten ebenso mit den Näherungen

1,00 2,71 2,64 3,14

oder gleich mit den ganzen Zahlen

100 271 264 314

anfangen, die Rechnung würde nicht anders verlaufen. Das ist – in sträflicher Vereinfachung – der Grund, warum man auch von solchen ›krummen‹ 4-Tupeln so schnell zu vier gleichen Zahlen kommt. Meistens jedenfalls! – Charly, was machen die Dreitausender, schon was gefunden?«

»Leider nein. Über die Höhe 11 bin ich noch nicht hinausgekommen. Langsam habe ich Zweifel, ob es in deinem mathematischen Gebirge Dreitausender gibt!« (Bild links oben)

»Wer hoch hinauf will, muss klettern«, meint Enrico und stopft gemütlich seine Pfeife, »du wirst sehen, damit kommt man ganz schön weit. In Höhe 3000 wird die Luft allerdings dünn … Mit Klettern meine ich, dass man Aufwärtsschritte machen muss! Man muss zu einem Tupel $(a, b, c, d)$ ein anderes Tupel $(x, y, z, u)$ finden, von dem aus es in einem Abwärtsschritt nach $(a, b, c, d)$ geht – also eines, das über $(a, b, c, d)$ liegt. So ein Tupel gibt es leider nicht immer. Aber wenn $a+b+c=d$ ist, existiert eins. Dann liegt nämlich $(x, y, z, u) = (0, a, a+b, a+b+c)$ einen Schritt über $(a, b, c, d)$. Das sieht man, oder? Zum Beispiel erfüllt (19, 3, 12, 34) die Bedingung: Es gilt $19+3+12=34$, also liegt (0, 19, 22, 34) einen Schritt darüber.

Hat man diesen Anstieg erst geschafft, ist auf der neuen Höhe leicht herumwandern, indem man zu den Zahlen des gefundenen Tupels eine Konstante addiert und/oder ihr Vorzeichen umdreht. So kommt man zu meinem ersten Beispiel $(37, 18, 15, 3) = (37, 37, 37, 37) - (0, 19, 22, 34)$, das ebenfalls einen Aufwärtsschritt über (19, 3, 12, 34) liegt.«

Enrico entzündet seine Pfeife und fährt unter dicken Rauchwolken fort:

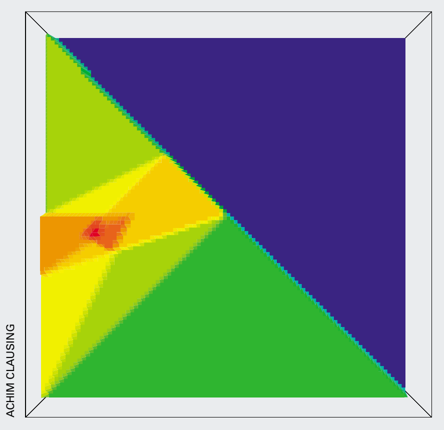
»Um nun in richtig große Höhen zu gelangen, sollte das um einen Schritt höhere Tupel am besten wieder von der Art

## Der Gipfel der Tupel

**Um auch bei schlechtem Wetter** einen Blick auf den Gran Tribonacci zu werfen, normiert man alle Tupel, indem man zuerst das Minimum abzieht und dann durch das Maximum teilt. Beispiel: Aus (37, 18, 15, 3) wird zuerst (34, 15, 12, 0) und dann (1, 15/34, 12/34, 0). Dadurch ändert sich an der Höhe des Tupels nichts, aber zwei der Komponenten haben die Werte 0 und 1, die anderen liegen irgendwo dazwischen. Durch Umstellung der Reihenfolge kann man noch (ohne Änderung der Höhe!) erreichen, dass die Null an der ersten Stelle steht und die Eins entweder an der dritten oder der vierten Stelle: $(0, x, 1, y)$ oder $(0, x, y, 1)$. Die Höhen dieser Punkte lässt man sich von einem Computer zeichnen.

Dabei stellt sich heraus, dass die Punkte $(0, x, 1, y)$ langweilig sind: Ihre Höhe reicht nur bis 5. Die Abbildung zeigt die Höhen der Punkte $(0, x, y, 1)$ (nur eine Hälfte des Diagramms ist gezeichnet, die andere sieht genauso aus). Wieder ist eine Hälfte langweilig: Für $x > y$ hat man immer Höhe 3 (die grüne Region). In der anderen Hälfte liegt der rot eingezeichnete Gran Tribonacci. Die Koordinaten seines Gipfels kann man genau bestimmen, es ist das Tupel $(0, 1/x^3, 1/x^3 + 1/x^2, 1) = (0, 0{,}160…, 0{,}456…, 1)$, wobei $x = 1{,}839…$ die positive Lösung der »Tribonacci-Gleichung« $1 + x + x^2 = x^3$ ist. Ohne Normierung hat der Gipfel die Koordinaten $(1, x, x^2, x^3)$ mit diesem $x$.

Hier und nur hier, in der unmittelbaren Nähe dieses Gipfels findet man wirklich hohe Tupel. Und der Gipfel selbst? Er ist der einzige Punkt, von dem aus man auch mit noch so vielen Schritten nicht in die Ebene gelangt! Von $(1, x, x^2, x^3)$ kommt man in einem Abwärtsschritt nach $0{,}839… \cdot (1, x, x^2, x^3)$. Das kann man noch so oft wiederholen, die Koordinaten werden nicht gleich. Auch wenn die Grafik das nicht darstellen kann: Der Gipfel des Gran Tribonacci ist unendlich hoch.




**Blick auf den Gran Tribonacci aus dem Flugzeug (links) und aus dem Satelliten, der in großer Höhe genau über dem Gebirge schwebt (rechts)**

sein, dass seine ersten drei Zahlen zusammen die vierte ergeben, ebenso das darüber liegende Tupel, und immer so weiter. Das wäre ein echter Steilaufstieg! Und den gibt es tatsächlich. Hier ist er: Es sind die Zahlen

0, 0, 1, 1, 2, 4, 7, 13, 24, 44, 81, 149, 274, 504, …

Man bekommt sie, wenn man mit 0, 0, 1 anfängt und dann immer die Summe der letzten drei Zahlen als nächste hinschreibt: $0+0+1=1$, $0+1+1=2$, $1+1+2=4$, … Das ist genau unsere »$a+b+c=d$«-Regel. Zu Ehren des Gran Tribonacci will ich sie die Tribonaccizahlen nennen. Das Wunderbare an ihnen ist: Wenn man je vier aufeinander folgende Tribonaccizahlen zu einem Tupel macht, dann werden diese Tupel höher und höher! Die Steigung auf unserem Aufstieg ist allerdings nicht gleichmäßig, es geht immer ein Stück eben, dafür liegt das nächste Tupel gleich um 3 Schritte höher:

2, 2, 5, 5, 8, 8, 11, 11, 14, 14, 17, …

Zum Beispiel hat (0, 0, 1, 1) die Höhe 2 und (81, 149, 274, 504) die Höhe 17. Na ja, und weil dieser Weg endlos nach oben führt, kommt man auf ihm irgendwann auch über die Dreitausender-Grenze. Und noch weit höher … Was für ein Berg, der Gran Tribonacci!«

Am nächsten Morgen hat es sich zugezogen, die Latschenkiefer und der Wetterbericht haben Recht behalten. Enrico lässt sich dadurch nicht von der Gipfelbesteigung abhalten, aber Ada und Charly finden den Aufstieg bei schlechtem Wetter zu riskant. Man tauscht noch Namen und E-Mail-Adressen aus, dann macht Enrico sich auf den Weg.

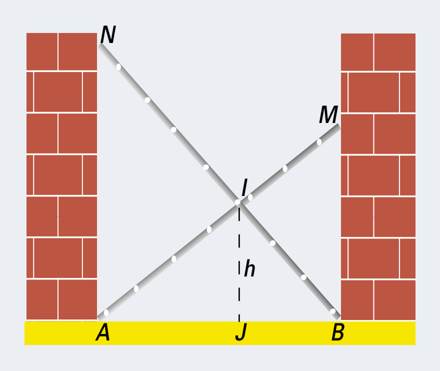
Charly sitzt schon wieder über seinem kleinen Notebook. »Guck doch mal ›Tribonacci‹ im Internet nach«, schlägt Ada vor. Und siehe da: Google findet nicht weniger als 1210 Webseiten. Plötzlich ist Charly elektrisiert: »Schau mal, da ist ja die Tribonaccifolge! Und ich dachte … Dabei gibt es sie ganz offiziell, Nummer A73 in der ›Online Encyclopedia of Integer Sequences‹.

Das ist eine interessante Webseite: Man kann die ersten paar Glieder einer Zahlenfolge eintippen, und die Encyclopedia gibt die Auskunft zurück, wie die Folge weitergeht, wie sie heißt und was die Mathematik darüber weiß. «

## PREISRÄTSEL

### Leitern

Von Pierre Tougne




**Folgendes Rätsel sorgte** Anfang des 20. Jahrhunderts für Kopfzerbrechen:

»Zwei Leitern unterschiedlicher Länge $\overline{AM}=a$ und $\overline{BN}=b$ stehen auf waagerechtem Boden schräg zwischen zwei senkrechten Mauern (siehe Skizze rechts). Der Schnittpunkt der beiden Leitern befindet sich in der Höhe $h$. Berechnen Sie den Abstand $d$ der beiden Mauern.«

Das Problem ist ohne Computer nur schwer zu lösen – und mit Computer nicht besonders reizvoll. Deshalb ist es dieses Mal Ihre Aufgabe, zu vorgegebenen Werten von $a$ und $b$ diejenigen Werte von $h$ zu bestimmen, für die das Problem überhaupt eine Lösung hat (formelmäßige Darstellung in Abhängigkeit von $a$ und $b$).

Finden Sie außerdem für die ganzzahligen Werte $a=119$ und $b=70$ einen ganzzahligen Wert von $h$, für den sich ebenfalls ganzzahlige Werte für $\overline{AB}$, $\overline{AN}$ und $\overline{BM}$ ergeben.

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Prepaidkarten »Holiday«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 13. Juli 2004, eingehen.

**Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.**

Charly tippt die Folge von gestern ein, und die Online Encyclopedia gibt sogar zwei Treffer zurück: A45794 und A65678. »Da steht ja die Geschichte, die Enrico uns als seine Entdeckung vorgesetzt hat. So ein Gauner!«

Ada kramt den Zettel mit Enricos Adresse heraus. »Enrico Ducci«, liest sie vor, »mal sehen, ob man unseren Freund googeln kann.« Die Suchmaschine spuckt merkwürdige Dinge aus: »R. Honsberger refers to the four-number sequence problem as Professor Enrico Ducci's observation.« Und, in italienischer Sprache, einen Lebenslauf: »Enrico DUCCI (1864–1940). Nacque a Fermo il 15–5–1864 e morì a Napoli il 29–7–1940. Autore di parecchi lavore di carattere didattico Necr.: Periodico di Matematiche (4) 20 (1940), 340.«

Auch ohne Italienischkenntnisse ist klar: Dieser Enrico Ducci weilt seit 1940 nicht mehr unter uns. »Irgendetwas stimmt da nicht.« Sie schauen aus dem Fenster, ob Enrico noch zu sehen ist. Aber den haben die Nebel längst verschluckt, mitsamt dem steilen Aufstieg und dem ganzen Gran Tribonacci, als hätte es das alles nie gegeben. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE




**Achim Clausing** ist Professor für Informatik an der Universität Münster (Westfalen).



A Mathematical Mountain Walk. Von Achim Clausing. Erscheint in: Pi in the Sky, 2004

Playing Diffy with real sequences. Von K. R. McLean in: Mathematical Gazette, Bd. 83, S. 58, 1999

Ingenuity in Mathematics. Von Ross Honsberger. Random House, New York 1970

Su una interessante curiosità numerica. Von C. Ciamberlini und A. Marengoni in: Periodico di Matematiche, Bd. 17, S. 25, 1937


Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

## Neuer Streit um das Ende der Dinosaurier

Nach jahrzehntelangen Debatten schien sich die Ansicht durchgesetzt zu haben, dass der Einschlag eines Asteroiden, dessen Krater in Mexiko entdeckt wurde, das Massensterben am Ende der Kreidezeit auslöste. Doch nun erheben Skeptiker neue Einwände

NASA / JPL / DONALD E. DAVIS

WEITERE THEMEN IM AUGUST

### Neue Hilfe bei Kreislaufschock

Schockpatienten sind in Lebensgefahr. Fast jeder zweite stirbt, weil die Notfallversorgung oft nicht anschlägt. Das Hormon Vasopressin scheint die Aussichten zu verbessern

### Olympia 2004

Wissenschaft fördert Rekorde: Besseres Training! Optimiertes Material! Gendoping?



### Emmy Noether

Trotz brillanter Einsichten wurde die Göttinger Mathematikerin von deutschen Universitäten weit gehend ignoriert. Mit 53 Jahren starb sie 1935 fast vergessen in den USA



JIM MCGRAW / WILDEYE IMAGES

### Wölfe im Yellowstone-Park

Seit in dem nordamerikanischen Naturschutzgebiet wieder Wölfe leben, regeneriert sich das ökologische Gleichgewicht – teilweise auf unerwartete Art

### Gab es eine Zeit vor dem Urknall?

Das Universum expandiert wie nach einer gigantischen Explosion, die vor rund 15 Milliarden Jahren stattfand. Demnächst verfügbare Instrumente könnten Spuren einer noch älteren Kompressionsperiode entdecken



ALFRED T. KAMAJIAN